

FERNANDO FELICE

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ENLACES PONTO-A-PONTO UTILIZANDO A FAIXA DE FREQUÊNCIA NÃO LICENCIADA DE 2,4GHZ EM TECNOLOGIA *SPREAD SPECTRUM*

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Horácio Tertuliano Filho, Ph.D.

CURITIBA

2005

FERNANDO FELICE

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ENLACES PONTO-A-
PONTO UTILIZANDO A FAIXA DE FREQUÊNCIA NÃO
LICENCIADA DE 2,4GHZ EM TECNOLOGIA *SPREAD
SPECTRUM***

**Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Elétrica com ênfase em Telecomunicações,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica, Universidade Federal do Paraná.**

Orientador: Horácio Tertuliano Filho, Ph.D.

CURITIBA

2005

FICHA CATALOGRÁFICA

FELICE, Fernando

Análise do Desempenho de Enlaces Ponto-a-Ponto utilizando a faixa de Frequência não Licenciada de 2,4GHz em Tecnologia *Spread Spectrum* / Fernando Felice. Curitiba: UFPR / Setor de Tecnologia / Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.

xviii, 148 p.: il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia / Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.

Curitiba: UFPR, 2005.

1. Espalhamento espectral, protocolo 802.11b. 2. Enlace ponto-a-ponto. 3. Frequência não licenciada, wi-fi. I. Tertuliano Filho, Horácio. II
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. III.Título.

CDD 621.3

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FELICE, Fernando. Análise do desempenho de enlaces ponto-a-ponto utilizando a faixa de frequência não licenciada de 2,4GHz em tecnologia *spread spectrum*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 148 p.

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ENLACES
PONTO-A-PONTO UTILIZANDO A FAIXA DE
FREQUÊNCIA NÃO LICENCIADA DE 2,4GHz EM
TECNOLOGIA *SPREAD SPECTRUM***

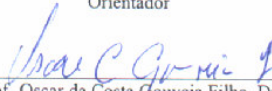
FERNANDO FELICE

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do

Paraná



Prof. Horácio Tertuliano Filho, Dr.
Orientador

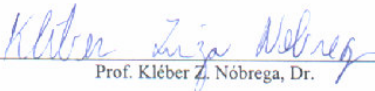


Prof. Oscar da Costa Gouveia Filho, Dr.
Coordenador do Programa em Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora



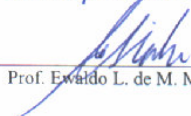
Prof. Horácio Tertuliano Filho, Dr.
Presidente



Prof. Kléber Z. Nóbrega, Dr.



Prof. Evélio M. G. Fernandez, Dr.



Prof. Ewáldo L. de M. Mehl, Dr.

DEDICATÓRIA

A todos os professores engenheiros que educam aplicando o coração à instrução e os
ouvidos às palavras do conhecimento

AGRADECIMENTOS

- Eterna gratidão ao Pai Criador, que concede o dom da sabedoria e que esteve presente em cada momento do desenvolvimento deste trabalho manifestando seu amor incondicional.
- Aos meus pais – Wagner e Wilma, que além da vida, me deram coragem para a luta, alento ao estudo e esperança no futuro.
- A Jociane, minha companheira de todos os momentos, pelo amor e dedicação.
- A minha filha Anne Caroline, dádiva Divina, pela compreensão nos momentos ausentes.
- Aos meus queridos irmãos - Ricardo e Paula pelo apoio e incentivo.
- Ao Dr. Horácio Tertuliano Filho, orientador e colega sempre presente para as sugestões, estímulo e paciência necessárias para a realização desta dissertação.
- Aos professores membros da banca examinadora – Dr. Kléber Zuza Nóbrega, Dr. Ewaldo Mehl e Dr. Evelio Fernandez pelas contribuições sempre pertinentes e bem-vindas.
- Ao sr. Cesar Beneti – Diretor do Simepar pelo apoio e recomendações apresentadas neste estudo.
- A colega Deize Kryczyk pela sua valorosa contribuição na revisão deste material.
- Aos colegas Ernandes Saraiva do Simepar, Moisés de Souza e Ronald Stahlke pelo apoio e colaboração nos trabalhos realizados e no fornecimento das informações necessárias ao desenvolvimento deste.
- Aos colegas professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná pelo agradável convívio nos dias laboriosos.

Por fim, a todos que acreditaram em meu sonho e, de maneira direta ou indireta, deixaram-me com os pés no chão, mas com a cabeça nas estrelas.

*“A nobreza da profissão está na nobreza do ser,
na consciência do dever cumprido com esmero
e, num primeiro plano, na humildade de ser
eterno aprendiz”.*

Sandra M.C. de Menezes Silva (2002)

RESUMO

A tecnologia das redes de acesso sem fio baseadas no protocolo IEEE 802.11b - também denominada de *Wi-Fi*, possui larga gama de aplicações atualmente no mercado mundial corporativo e doméstico. No Brasil, esta tecnologia encontra-se em plena operação nas principais cidades e tem se mostrado atrativa no que tange aos acessos ponto-a-ponto. O presente trabalho analisa o desempenho destes enlaces para a faixa de frequência de 2,4GHz, que utiliza a tecnologia de modulação por Espalhamento Espectral e não requer a necessidade do licenciamento da sua utilização junto aos órgãos competentes. São descritas as características consideradas importantes da tecnologia *Wi-Fi* para a realização de um enlace ponto-a-ponto e exibido um estudo de caso de um *link* existente na região urbana de Curitiba, para a investigação dos fatores envolvidos no dimensionamento e desempenho e comparado de forma teórica através da utilização de uma ferramenta de simulação de rádio enlaces. Os resultados são analisados e as limitações recomendadas nas aplicações.

Palavras-chave: Sistemas de telecomunicações, espalhamento espectral, protocolo IEEE 802.11b, enlace ponto-a-ponto, frequência não licenciada, *Wi-Fi*.

ABSTRACT

Nowdays, wireless network technologies based on the IEEE 802.11b protocol, also known as Wi-Fi, include a wide range of applications in domestic and corporative global markets.

In Brazil, the technology is fully operational in the main cities across the country and has shown good results as per its point-to-point accesses applications.

This document analyzes the performance of such enlacs under the 2.4 GHz frequency, which adopts the modulation in Spread Spectrum technology and does not require license on its utilization at the controlling agencies.

The main features involving the set up of a link peer to peer using the Wi-Fi technology are described, and a study of case involving an existing link at the Curitiba metropolitan area is exhibited. The investigation of the aspects involved with sizing and performance are made possible and compared from a theoretical standpoint, through the utilization of a tool for simulating a radio links.

The results are presented with recommended restrictions when using the application.

Key-Words: Spread spectrum, IEEE 802.11b protocol; point-to-point; unlicensed frequency; Wi-Fi.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE TABELAS.....	xvi
LISTA DE ABREVIATURAS	xvii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 OS SISTEMAS DE RÁDIO ENLACE.....	6
1.1 INTRODUÇÃO.....	6
1.2 HISTÓRICO DO RÁDIO ENLACE.....	6
1.3 CONCEITO DE RÁDIO ENLACE	8
1.4 PRINCIPAIS APLICAÇÕES DOS SISTEMAS RÁDIO ENLACES PONTO-A-PONTO.....	10
1.5 PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS	12
1.5.1 HISTÓRICO	12
1.6 O MEIO DE TRANSMISSÃO	13
1.7 PERCURSOS DE PROPAGAÇÃO	14
1.8 FENÔMENOS DA PROPAGAÇÃO.....	15
1.9 FAIXAS DE PROPAGAÇÃO	19
1.10 ZONA DE FRESNEL	20
1.11 CONCLUSÃO	23
1.12 REFERÊNCIAS.....	24

CAPÍTULO 2	O PADRÃO 802.11.....	25
2.1	INTRODUÇÃO.....	25
2.2	REDES DE ACESSO LOCAL SEM FIO – WLAN	26
2.3	TECNOLOGIA DAS WLANs.....	29
2.4	SALTO EM FREQUENCIA OU FHSS	31
2.5	SEQÜÊNCIA DIRETA – DSSS.....	32
2.6	O PROTOCOLO 802.11	33
2.6.1	ESPECIFICAÇÕES DO PROTOCOLO 802.11	34
2.6.2	ARQUITETURA DA REDE	35
2.6.3	A CAMADA FÍSICA - PHY	36
2.6.4	A CAMADA DE ENLACE.....	39
2.6.5	A FAMÍLIA 802.11	46
2.6.6	O PROTOCOLO 802.11a.....	46
2.6.7	O PROTOCOLO 802.11b	47
2.6.8	O PROTOCOLO 802.11g	47
2.6.9	O PROTOCOLO 802.11n	48
2.7	O ESPECTRO DE FREQÜÊNCIAS	49
2.8	EQUIPAMENTOS DE RADIAÇÃO RESTRITA.....	50
2.8.1	CONDIÇÕES GERAIS DE USO PARA A RADIAÇÃO RESTRITA.....	50
2.8.2	RESOLUÇÃO ANATEL N.º 365/2004	53
2.8.3	RESOLUÇÃO ANATEL N.º 397/2005	55
2.9	FREQÜÊNCIAS LICENCIADAS E FREQÜÊNCIAS NÃO LICENCIADAS.....	56

2.9.1	FREQÜÊNCIAS LICENCIADAS.....	57
2.9.2	FREQÜÊNCIAS NÃO LICENCIADAS	57
2.10	CONCLUSÃO.....	58
2.11	REFERÊNCIAS.....	59
CAPÍTULO 3 MECANISMOS DE PROPAGAÇÃO		61
3.1	INTRODUÇÃO.....	61
3.1.1	MODELOS DE PROPAGAÇÃO	61
3.2	MODELOS EMPÍRICOS DE PROPAGAÇÃO.....	62
3.3	MODELOS TEÓRICOS DE PROPAGAÇÃO.....	63
3.4	MODELOS HÍBRIDOS DE PROPAGAÇÃO.....	63
3.5	MODELO DE PROPAGAÇÃO <i>STANFORD UNIVERSITY INTERIM</i> (SUI).....	64
3.6	ANÁLISE DOS MECANISMOS DE PROPAGAÇÃO PARA FAIXA DE 2,4GHz.....	66
3.6.1	A FAIXA DE UHF	67
3.6.2	REFRAÇÃO ATMOSFÉRICA	67
3.6.3	REFLEXÃO.....	69
3.6.4	DIFRAÇÃO	71
3.6.5	ATENUAÇÃO DEVIDO A CHUVAS.....	72
3.6.6	ATENUAÇÃO DEVIDO A ATMOSFERA	73
3.6.7	DESVANECIMENTO OU <i>FADING</i>	74
3.7	CÁLCULO DO ENLACE DE UM SISTEMA DE RÁDIO DIGITAL NA FAIXA DE 2,4GHz.....	75

3.7.1	CRITÉRIOS DE RÁDIO VISIBILIDADE	75
3.7.2	CÁLCULO DAS ALTURAS DAS ANTENAS.....	76
3.7.3	CÁLCULO DA ATENUAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE (A_E).....	79
3.7.4	CÁLCULO DA ATENUAÇÃO TOTAL LIQUÍDA (A_T).....	80
3.7.5	CÁLCULO DO NÍVEL DE RECEPÇÃO NOMINAL (P_m).....	80
3.8	ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE E DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA RÁDIO DIGITAL NA FAIXA DE 2,4GHz	81
3.8.1	ESTUDO DAS INTERFERÊNCIAS.....	82
3.8.2	ANÁLISE DAS INTERFERÊNCIAS	87
3.8.3	COMPARAÇÃO DO ATENDIMENTO DE DESEMPENHO E DISPONIBILIDADE.....	89
3.9	CONCLUSÃO	90
3.10	REFERÊNCIAS	91
CAPÍTULO 4	ESTUDO DE CASO.....	94
4.1	INTRODUÇÃO.....	94
4.2	O <i>SOFTWARE</i> DE PREDIÇÃO CELPLANNER	94
4.3	O ESTUDO DE CASO SIMEPAR	95
4.4	DADOS TÉCNICOS DO ENLACE	104
4.5	SIMULAÇÃO DO RÁDIO ENLACE PELO <i>SOFTWARE</i>	110
4.6	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO ENLACE	115
4.6.1	PREDIÇÕES DE INTERFERÊNCIA.....	118
4.7	RESULTADO DO ESTUDO DE CASO SIMEPAR	118

4.8	CONCLUSÃO	119
4.9	REFERÊNCIAS	121
CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		122
5.1	CONCLUSÃO	122
5.2	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	126
REFERÊNCIA GERAL.....		127
APÊNDICE I		134
APÊNDICE II.....		137
ANEXO I.....		140
ANEXO II		143
ANEXO III.....		145
ANEXO IV		147

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ELEMENTOS DE UMA COMUNICAÇÃO BÁSICA	8
FIGURA 2 - ELEMENTOS DA RÁDIO COMUNICAÇÃO	8
FIGURA 3 - PRINCIPAIS MECANISMOS DE PROPAGAÇÃO.....	15
FIGURA 4 - ELIPSÓIDE DE FRESNEL	21
FIGURA 5 - TOPOLOGIA DE REDE SEM FIO DO TIPO <i>AD HOC</i>	27
FIGURA 6 – TOPOLOGIA DE REDE SEM FIO DO TIPO ÍNFR-ESTRUTURA	28
FIGURA 7 - <i>SPREAD SPECTRUM</i> X TRANSMISSÃO À BANDA ESTREITA	30
FIGURA 8 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA FH.....	32
FIGURA 9 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DS	33
FIGURA 10 – ARQUITETURA BÁSICA DO 802.11	36
FIGURA 11 – MODELO OSI PARA O 802.11.....	39
FIGURA 12 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO CSMA/CA.....	41
FIGURA 13 – ESPAÇAMENTO ENTRE QUADROS NO 802.11	43
FIGURA 14 – ESQUEMA BÁSICO DE ACESSO NO DCF	44
FIGURA 15 – DCF UTILIZANDO RTS E CTS	45
FIGURA 16– VALOR DE K EXCEDIDO PARA 99,9 % DO TEMPO NO PIOR MÊS DO ANO (CLIMA CONTINENTAL TEMPERADO)	69
FIGURA 17– REFLEXÃO DO TIPO DIFUSA	70
FIGURA 18 – REFLEXÃO DO TIPO REGULAR	70
FIGURA 19 – DIFRAÇÃO DA TERRA	71
FIGURA 20– ATENUAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE PARA A FREQUÊNCIA DE 2,4GHZ.	79
FIGURA 21- CENTRO DE OPERAÇÕES DO SIMEPAR	97
FIGURA 22– EDIFÍCIO SEDE DO SIMEPAR	97
FIGURA 23 – RADAR METEOROLÓGICO TIPO DOPPLER LOCALIZADO EM TEIXEIRA SOARES	98
FIGURA 24 – DETALHE DA ANTENA DO ENLACE RADAR – SÃO LUIS DO PURUNÃ	98

FIGURA 25 – SISTEMA IRRADIANTE DO REPETIDOR EM SÃO LUIS DO PURUNÃ	99
FIGURA 26 – ÁREA DE ABRANGÊNCIA DO RADAR METEOROLÓGICO DO SIMEPAR	100
FIGURA 27 – TELA DO <i>SOFTWARE</i> DE MONITORAMENTO DO <i>LINK</i> ENTRE CURITIBA E SÃO LUIS DO PURUNÃ – SENTIDO SEDE-REPETIDORA.	101
FIGURA 28 - TELA DO <i>SOFTWARE</i> DE MONITORAMENTO DO <i>LINK</i> ENTRE CURITIBA E SÃO LUIS DO PURUNÃ – SENTIDO REPETIDOR-SEDE.....	102
FIGURA 29 - TELA DO <i>SOFTWARE</i> DE MONITORAMENTO DO <i>LINK</i> ENTRE SÃO LUIS DO PURUNÃ E TEIXEIRA SOARES – SENTIDO REPETIDOR-RADAR.	103
FIGURA 30 - TELA DO <i>SOFTWARE</i> DE MONITORAMENTO DO <i>LINK</i> ENTRE SÃO LUIS DO PURUNÃ E TEIXEIRA SOARES – SENTIDO RADAR-REPETIDOR.	103
FIGURA 31 – POLIGONAL DA ROTA EDIFÍCIO SEDE – REPETIDORA EM SÃO LUIS DO PURUNÃ	104
FIGURA 32 – POLIGONAL DA ROTA REPETIDOR SÃO LUIS DO PURUNÃ – RADAR TEIXEIRA SOARES.....	105
FIGURA 33 – BASTIDOR DO EQUIPAMENTO.....	106
FIGURA 34 – ESQUEMA DE LIGAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	106
FIGURA 35 – ANTENA PARABÓLICA MONTADA NA TORRE DE SÃO LUIS DO PURUNÃ, SENTIDO RADAR (TEIXEIRA SOARES).....	107
FIGURA 36 – MODELO DA ANTENA SEMI-PARABÓLICA MONTADA NA TORRE DO EDIFÍCIO SEDE E NO REPETIDOR DE SÃO LUIZ DO PURUNÃ.....	108
FIGURA 37 - MAPA DA REGIÃO URBANA DE CURITIBA.	111
FIGURA 38 – PLANIMETRIA DO TERRENO PARA O ENLACE	112
FIGURA 39 – ALTIMETRIA EM 2D PARA O ENLACE	113
FIGURA 40 – ALTIMETRIA EM 3D PARA O ENLACE	113
FIGURA 41 – BASE DE DADOS MORFOLÓGICOS DO TERRENO DO ENLACE	114
FIGURA 42 - DIFERENÇA ENTRE A ÁREA URBANA E A ÁREA URBANA DENSE.....	115
FIGURA 43 – TELA DE DADOS DO <i>SOFTWARE CELLINK</i>	116
FIGURA 44 - PERFIL DO RÁDIO-ENLACE PARA $K_{MÉD}=4/3$	117
FIGURA 45 – PERFIL DO RÁDIO-ENLACE PARA $K_{MÍN}=0,72$	117

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – FAIXAS DE FREQUÊNCIA	19
TABELA 2 – COMPARATIVO ENTRE AS SUBFAMÍLIAS DO 802.11	48
TABELA 3 – TIPOS DE EQUIPAMENTO DE RADIAÇÃO RESTRITA.....	51
TABELA 4 – VALORES NUMÉRICOS PARA OS PARÂMETROS DO MODELO SUI.....	66
TABELA 5 – PARÂMETROS DA CHUVA SEGUNDO A RECOMENDAÇÃO ITU R 837	73
TABELA 6 – LIBERAÇÃO DO RAIO DE FRESNEL EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA	76
TABELA 7 - PARÂMETROS DO RÁDIO ENLACE	104
TABELA 8 – CONSOLIDAÇÃO DO ENLACE CURITIBA – SÃO LUIS DO PURUNÃ.....	109

LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS

SIGLA	DESCRIÇÃO
ACK	Acknowledge
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AP	Access Point
BER	Bit Error Ratio
BSA	Basic Service Area
BSS	Basic Service Set
CCA	Clear Channel Assessment Signal
CCC	Central de Comutação e Controle
CDMA	Code Division Multiple Access
CITEL	Comissão Interamericana de Telecomunicação
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing
COST	European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTS	Clear To Send
DCF	Distributed Coordination Function
DIFS	Distributed InterFrame Space
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
DS	Direct Sequence
ECC	Electronic Communication Committee
EIFS	Extended InterFrame Space
E.I.R.P.	Equivalent Isotropic Radiated Power
ELF	Extremely Low Frequency
ERB	Estação Rádio Bases
ESA	Extended Service Area
ESS	Extended Service Set
FCC	Federal Commission of Communications
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FDTD	Finite Difference Time Domain
FH	Frequency Hopping
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IRF	Interference Rejection Factor
ISM	Industrial, Scientific on Medical Band
ITU-R	International Telecommunication Union – Radiocommunication Group

SIGLA	DESCRIÇÃO
ITU-T	International Telecommunication Union – Radiocommunication Group
LAN	Local Area Network
LF	Low Frequency
LGT	Lei Geral de Telecomunicações
LLC	Logical Link Control
LOS	Line Of Sight
MAC	Media Access Control
MF	Medium Frequency
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTR	Mean Time To Repair
NAV	Network Allocation Vector
NLOS	Non Line Of Sight
OEM	Onda EletroMagnética
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSI	Open System Interconnection
PCF	Point Coordination Function
PDH	Plesiochronal Digital Hierarchy
PDU	Packet Data Units
PHY	Physical Layer
PIFS	Priority InterFrame Space
PMP	Ponto-MultiPonto
PN	PseudNoise
PPM	Pulse Position Modulation
PP	Pont-to-Point
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RF	Radio Frequência
RSSI	Receiver Signal Strength Indicator
RTS	Read To Send
S/N	Signal/ Noise ratio
SDH	Sinchronal Digital Hierarchy
SES	Severely Errors Seconds
SHF	Super High Frequency
SIFS	Short InterFrame Space
SNR	Signal Noise Ratio
STA	STAtion

SIGLA	DESCRIÇÃO
SUI	Stanford University Interim
TDMA	Time Division Multiple Access
UHF	Ultra High Frequency
UNI	Unlicensed National Information Infrastructure
UTD	Uniformity Theory of Diffraction
VHF	Very High Frequency
VLF	Very Low Frequency
WAN	Wide Area Network
WEP	Wired Equivalent Privacy
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

INTRODUÇÃO

A necessidade do envio de informações de forma ágil pelo ser humano pode ser observada através dos tempos, pela história das civilizações. Desde a comunicação entre os povos, realizada por meios visuais e sonoros para distâncias curtas, passando pela utilização de sua energia ou a dos animais para médios trechos, até os dias atuais utilizando as telecomunicações para abrangências intercontinentais, o homem busca incansavelmente soluções alternativas para melhorar a eficácia de suas comunicações.

A criatividade aliada ao desafio da superação, sempre esteve presente na evolução do ser humano através de grandes exemplos para as comunicações sem o auxílio dos fios, tais como o desenvolvimento de códigos básicos pré-estabelecidos feitos pelos índios da América do Norte, que enviavam sinais de fumaça, ou de povos na savana africana, através de tambores, contando inclusive com postos de retransmissão.

A era das comunicações sem fio atual iniciou-se no século XIX, mais precisamente em 1831, com a descoberta realizada pelo físico-químico inglês Michael Faraday, que efetuou inúmeros estudos sobre eletricidade e magnetismo, descobrindo o fenômeno da indução magnética que, em linhas gerais, explica porque uma corrente elétrica variável ao circular em uma bobina induz uma corrente elétrica variável em outra bobina, mesmo que as duas bobinas não estejam diretamente conectadas.

A partir daí, o notável físico escocês James Clerk Maxwell em 1865, demonstrou através de postulados, a teoria sobre a existência e a propagação das ondas eletromagnéticas – a unificação dos fenômenos interligados entre o magnetismo e a eletricidade. Esta teoria se resumiu em quatro elegantes equações, que regem de modo geral o comportamento das ondas eletromagnéticas.

A confirmação experimental do uso destas notórias Equações de Maxwell somente foi realizada na prática em 1888 pelo físico alemão Heinrich Rudolf Hertz. A

partir destes experimentos e aliada à descoberta alguns anos antes do telégrafo em 1844 pelo pintor americano Samuel Morse, e do telefone pelo cientista escocês Alexander Graham Bell em 1876, vários cientistas motivaram-se a enviar mensagens a distância. Entre eles, além do físico russo Aleksander Stepanovich Popov, pode-se destacar o nome do padre gaúcho de Porto Alegre, Roberto Landell de Moura, que em 1893 transmitiu sinais e sons musicais a uma distância de 8km na cidade de São Paulo (entre a Av. Paulista e o bairro Alto de Santana), em um sistema de telefonia sem fio por ele desenvolvido.

Infelizmente, devido a sua pouca credibilidade científica, teve dificuldades em patentear tal invento, por isso a fama foi para o cientista italiano Guglielmo Marconi, que, em 1895, realizou a transmissão de um sinal de rádio para um receptor distante 2,5km, em Bologna na Itália. Depois, realizou várias outras brilhantes experiências, isto devido a sua grande projeção no mundo científico. Dentre elas, destacam-se as de 1901, quando realizou a primeira transmissão sobre o oceano atlântico, utilizando antenas amarradas em pipas, enviando a letra S em código Morse (três pontos) entre a Inglaterra e o Canadá, perfazendo cerca de 3.500km; e a de 1931, quando da inauguração da estátua do Cristo Redentor, no alto do Corcovado, na cidade do Rio de Janeiro, em que a iluminação foi acionada por um sinal de rádio de ondas curtas, transmitido diretamente da Itália por Marconi.

Após tais eventos, o mundo não deixou mais de presenciar inovações tecnológicas nas telecomunicações sem fio, algumas impulsionadas infelizmente por guerras, mas que trouxeram ao homem moderno a mobilidade e a confiabilidade de que necessita para enfrentar a exigência do mundo corporativo e a comodidade da vida cotidiana.

A Internet foi o último grande baluarte na história contemporânea das telecomunicações e atualmente nota-se que o crescimento do acesso à mesma pelas pessoas físicas e jurídicas através da banda larga observado nos últimos anos, também contribuiu para o aumento nos meios do acesso sem fio em alta velocidade.

Além das tecnologias já consolidadas para tal, como o *ADSL* e o *Cable Modem*, os sistemas *Wireless* deram a sua contribuição, através do acesso ponto-a-

ponto para a constituição de redes básicas de transmissão (*backhauled*) ou o ponto-multiponto, fornecido por empresas provedoras de acesso que se utilizam da tecnologia *Spread Spectrum* aplicada ao protocolo IEEE 802.11 e regulamentada pela ANATEL, que apesar de não exigir licenciamento desta exploração junto aos seus assinantes, monitora a potência máxima permitida.

Mas esse controle nem sempre é feito com rapidez e eficiência por parte deste órgão, e o que se tem notado é que os enlaces se degradam em termos de desempenho e acontece a redução de disponibilidade dos mesmos, devido a interferências geradas pelas próprias comunicações dos sistemas que incidem umas sobre as outras.

A implantação adequada de enlaces de rádio não licenciados depende da detecção e anulação das fontes de interferência existentes, o que não é uma tarefa simples. Em um país como o Brasil de dimensões continentais, que teve um processo de abertura do mercado feita através da privatização do sistema Telebrás, acarretando a entrada de novas operadoras, acirrando a concorrência e o conseqüente aumento da demanda das capacidades de transmissão em todos os níveis, tais como as redes de acesso aos assinantes e os *backbones* – regionais/nacionais/internacionais, para poder atender aos novos tipos de serviços e primordialmente a Internet, tornam a situação ainda mais complexa.

A situação se torna mais crítica em regiões metropolitanas e urbanas ao ressaltar que o espectro é limitado e aberto, e que para se ter um bom rádio enlace com bom desempenho e disponibilidade, é fundamental a escolha da faixa e do plano de frequências adequado – o que não é possível para as faixas de frequência não licenciadas.

O presente trabalho visa apresentar os parâmetros que influenciam de forma significativa na interferência do enlace ponto-a-ponto para rádios não licenciados na faixa de 2,4GHz, e como eles afetam o desempenho deste enlace, de forma a permitir maior confiabilidade quando da elaboração de um projeto desta natureza.

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho contemplou a pesquisa de natureza qualitativa, por meio do levantamento bibliográfico baseado na literatura específica, a fim de buscar em materiais já publicados, documentos que

ajudassem a responder as questões levantadas na problemática do tema em estudo; e a pesquisa exploratória através da análise de um caso real.

O estudo de caso é o enlace do Instituto SIMEPAR – entidade que fornece previsões meteorológicas para o Estado do Paraná, interligando o radar meteorológico, situado no município de Teixeira Soares – PR até a Central de Operações do Instituto, localizado na Universidade Federal do Paraná, Campus Centro Politécnico, em Curitiba, perfazendo uma distância em linha reta de aproximadamente 110km, com um repetidor localizado em São Luis do Purunã; a distância entre o radar e o repetidor é de cerca de 70km e entre este e a Central de operações em Curitiba é cerca de 40km.

Há a utilização ainda de uma ferramenta computacional chamada CellPlanner™, que calcula um rádio enlace, apresentando o desempenho de previsões previamente programadas com um nível de precisão excelente para o escopo deste trabalho. O referido *software* apresenta também bases de dados topográficos e cartográficos da região pretendida em análise, ou seja, de Curitiba e da região central do estado do Paraná.

Para atingirem-se os resultados pretendidos, o presente trabalho foi então subdividido como se segue:

No CAPÍTULO 1 é apresentado um histórico da evolução dos sistemas de rádio enlaces. O objetivo é o de posicionar o leitor e ao mesmo tempo fornecer uma síntese do cenário atual. Ainda neste capítulo são abordadas as características consideradas importantes para a elaboração de um enlace e sua arquitetura básica.

No CAPÍTULO 2 o protocolo 802.11 é descrito e suas características específicas são apresentadas, visando a sua utilização em rádio enlaces, bem como a legislação vigente definida pela ANATEL.

No CAPÍTULO 3 é feita a parametrização de um rádio enlace nas condições definidas por este trabalho e são analisados os detalhes que influenciam no desempenho do mesmo.

No CAPÍTULO 4 é realizado o estudo de caso de um enlace em operação e feita a comparação utilizando a ferramenta computacional para a predição de sistemas sem fio. Os resultados são apresentados e comentados.

Encerrando o trabalho, no CAPÍTULO 5 são apresentadas as comparações e conclusões finais, bem como os estudos futuros que poderão dar prosseguimento a partir deste.

CAPÍTULO 1

OS SISTEMAS DE RÁDIO ENLACE

Este capítulo faz um breve histórico dos sistemas de Rádio Enlace, mostrando as características básicas iniciais. Além disso, será mostrada a sua arquitetura básica com uma discussão de seus componentes, tendo como objetivo a melhor compreensão dos capítulos a seguir.

1.1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas muito se tem escrito sobre a propagação das ondas e a concatenação das mesmas em forma de rádio enlace. O objetivo do presente capítulo é o de apresentar de forma tutorial e simplificada os principais conceitos necessários para o entendimento e futuro projeto de um rádio-enlace na faixa de frequência de 2,4GHz tal como anteriormente proposto.

Foram considerados como relevantes à definição específica de um rádio-enlace, os principais equipamentos utilizados, suas principais aplicações, a propagação das ondas eletromagnéticas, seus mecanismos de propagação, o meio no qual as mesmas se propagam, os percursos de propagação e seus fenômenos, a classificação das faixas de frequências e a zona de Fresnel.

1.2 HISTÓRICO DO RÁDIO ENLACE [1]

O conceito de rádio enlace foi introduzido após as primeiras experiências de Marconi no final do século XIX utilizando as ondas curtas. Mas somente a partir da segunda guerra mundial é que foram desenvolvidos estudos no envio de sinais à longa distância utilizando as frequências em VHF, UHF e SHF.

No Brasil, o primeiro enlace analógico de telefonia fixa foi implantado em 1957 entre São Paulo e o Rio de Janeiro, derivando para Campinas. Em seguida, vieram os primeiros enlaces analógicos de alta capacidade, implantados pela Embratel

e pelo Grupo Telebrás a partir da metade do ano de 1965, com o objetivo de instalar e explorar os grandes troncos nacionais de microondas, integrantes do Sistema Nacional de Telecomunicações e suas conexões com o exterior utilizando, para tal, as faixas de frequência de 4, 6, 8 e 11GHz, com capacidade de 1800 canais em sua maioria. Em 1969 foi inaugurado o tronco Sul de Microondas da Embratel, interligando as cidades de São Paulo e Porto Alegre, passando por Curitiba. Em 1971 a mesma operadora completa a primeira malha de rotas de microondas, interligando todos os estados e territórios federais ao Distrito Federal, deixando felizes os usuários de ligações interurbanas que ficavam esperando de 6 a 8 horas para completar ligações interurbanas naquela época.

Os primeiros Rádios Digitais ponto-a-ponto instalados no Brasil começaram a operar no final da década de 1970 pelas empresas do Grupo Telebrás, utilizando a tecnologia PDH¹ de baixa e média capacidade - até 34Mbps, na faixa de 8,5GHz; posteriormente utilizaram os rádios de 2GHz, para a capacidade de 34Mbps também. No final da década de 80 e início da década de 1990, foi utilizada a faixa acima dos 10GHz, iniciando por 15 e 18GHz e depois estendendo para a faixa de 23 e 38GHz, especialmente para enlaces curtos, com baixa e média capacidade nas regiões metropolitanas. Também na segunda metade dos anos 90, foram implantados os rádios PDH de capacidade de 140Mbps na faixa de 5GHz.

No início dos anos 90, os primeiros rádios SDH² foram implantados pela Embratel, a fim de substituir gradualmente os rádios analógicos e os digitais em PDH, utilizando a faixa de 5GHz em regime de compartilhamento com o PDH de alta capacidade – 140Mbps. Posteriormente foram regulamentadas as faixas de 4; 6; 7,5; 8 e 11GHz para a utilização em troncos de média e longa distância pelas operadoras. As faixas de 18 e 38GHz foram homologadas para a utilização em enlaces de curta distância.

¹ PDH - Hierarquia Digital Plesiócrons (quase síncrona).

² SDH – Hierarquia Digital Síncrona.

1.3 CONCEITO DE RÁDIO ENLACE

Para acontecer uma comunicação básica entre dois pontos devem-se ter obrigatoriamente três componentes, conforme a FIGURA 1:

- Transmissor
- Receptor
- Meio de transmissão da comunicação



FIGURA 1 - Elementos de uma comunicação básica

Quando essa comunicação deve ser realizada em distâncias maiores que o alcance da voz humana, lançamos mão do conceito de telecomunicações³, para então definirmos qual será o meio físico dessa transmissão; se gasoso, onde se utiliza o espaço livre – o ar, ou o meio sólido para os cabos, que utilizam materiais tais como o cobre ou a fibra óptica predominantemente em relação a outros materiais.

A Radiocomunicação estuda as telecomunicações sob o prisma da utilização do meio aéreo, através das ondas eletromagnéticas que se deslocam do transmissor ao receptor e vice-versa, conforme a FIGURA 2. A propagação da onda ocorre quando há a transferência de energia eletromagnética entre esses dois pontos pela atmosfera terrestre ou ambiente aberto e ilimitado [2].



FIGURA 2 – Elementos da Rádio Comunicação

³ Do latim, tele significa distância.

A energia será distribuída por todo o espaço, mas apenas uma parte da potência irradiada pela antena transmissora chegará à antena receptora. O Rádio enlace ou sistema Rádio ponto-a-ponto define de que forma a interligação entre os pontos de transmissão e recepção pode ser feita, a fim de garantir que o sinal gerado em sua origem chegue a seu destino inteligível, dentro de uma taxa de erros aceitável, levando-se em consideração os diversos fatores que serão analisados neste trabalho; também chamado de Radiovisibilidade, pois se considera que existe visada entre as duas antenas, a transmissora e receptora, para que o enlace aconteça com sucesso.

Portanto, para que um rádio enlace funcione satisfatoriamente [3], são necessários os seguintes requisitos básicos:

- 1) A intensidade do sinal recebido deve ter potência suficiente para se sobrepor ao sinal do ruído recebido,
- 2) A intensidade do sinal deve ser propagada sem distorção excessiva, ou seja, a onda deve ser transmitida em uma faixa de frequência com atenuação e velocidade de propagações constantes, para as frequências da faixa.
- 3) Para que o rádio enlace tenha confiabilidade, conforme o seu grau, as condições acima devem permanecer constantes na maior parte do tempo.

Para a melhor compreensão da questão da confiabilidade e o seu grau, define-se que o projeto de um rádio enlace pode ser do tipo: otimizado, superdimensionado ou subdimensionado.

Um rádio enlace é considerado otimizado quando ele é elaborado sob medida para atender a finalidade a que se destina, ou seja, está na melhor relação custo – benefício, ou ainda, tecnicamente correto para aquela específica situação ao menor valor monetário a ser despendido. Isto significa que este projeto deve ser executado com confiabilidade somente na situação que foi considerada, sem levar em conta expansões futuras ou qualquer tipo de troca de componentes que constituem o sistema que não sejam exatamente com os mesmos parâmetros especificados do original. Entretanto, para a realização dos cálculos, tomam-se margens de certos parâmetros

dependendo do grau de precisão necessários que estes exigem. Um exemplo que se enquadra bem nisto, seria a dos parâmetros climáticos e topográficos de propagação empregados no cálculo de desempenho que, quando não encontrados para determinada região do país, são utilizados os valores estatísticos do ITU-R⁴.

De maneira análoga ao explicado acima, um sistema é definido como superdimensionado, quando o dimensionamento dos parâmetros e componentes do sistema é valorizado bem acima do necessário. Neste caso, pode ocorrer pela imperícia do projetista ou para que o Rádio enlace esteja planejado para suportar futuras expansões. Para o primeiro caso, que é considerado grave, além do desperdício financeiro que acarreta, problemas técnicos também surgem, como por exemplo superdimensionar a altura de torres e antenas, tornando assim o enlace mais susceptível a interferências e reflexões, além de perda do nível de reflexão e possível desvanecimento pelo aumento da metragem do cabo coaxial utilizado.

Por outro lado, um sistema é dito subdimensionado quando sua valorização é considerada inferior ao mínimo aceitável, acarretando o mau funcionamento do Rádio enlace através de alta taxa de erros de *bit* e, por conseguinte, a degradação rápida do *link*.

A concepção de um rádio enlace deve então levar em consideração os aspectos abordados, bem como a análise de aspectos sistêmicos do mesmo a fim de garantir um funcionamento dentro do projetado.

1.4 PRINCIPAIS APLICAÇÕES DOS SISTEMAS RÁDIO ENLACES PONTO A PONTO

A partir do final dos anos 1970, as operadoras de telefonia no Brasil iniciaram o chamado processo de digitalização de suas redes, para um melhor atendimento à crescente demanda de serviços e uma importante maneira da redução de custos. Além das centrais de comutação se tornarem digitais, nesta época os equipamentos de rádio enlaces também o fizeram, pois não fazia sentido algum a utilização de rádios

⁴ International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector

analógicos nas transmissões, pois as centrais necessitavam de sinais multiplexados em frequência na entrada destas.

Ao escolher o meio de transmissão para uma rede, os provedores de serviços se deparam com questões como qualidade, confiabilidade e custos. Em termos de capacidade de transmissão, a fibra óptica ainda é imbatível se comparada com relação ao rádio. Mas a confiabilidade é um forte fator a ser considerado, e, portanto a melhor solução seria aquela onde se utiliza a redundância de um sistema com a tecnologia diferente da utilizada na rede principal, seja o rádio ou a fibra; a utilização de sistemas híbridos, parte fibra e parte rádio, também é uma solução a ser considerada.

A escolha pelo sistema de rádio apresenta forte apelo para prover o acesso a regiões distantes e de difícil acesso; ou quando se necessita estabelecer uma ligação de forma rápida, flexível e, desta forma, se destacam para o caso de localidades, geralmente metrópoles altamente povoadas, onde lançar um cabo pode se tornar inviável devido, por exemplo, a leis de zoneamento municipal, ou demandar um tempo muito longo.

As principais aplicações [4] para os rádios enlaces, em conjunto com outros meios de acesso são:

- Redes de transporte das operadoras de telefonia regionais e de longa distância são utilizadas para os chamados *backbones* - que são as redes principais, para os entroncamentos secundários, de longa distância ou para redes metropolitanas;
- Redes Corporativas – para a interligação de suas unidades com a unidade central, localizadas em metrópoles, outras cidades ou estados;
- Rede de transporte das operadoras de sistemas celulares fixos ou móveis – utilizado para a conexão entre as Estações Rádio Bases (ERB) e a Central de Comutação e Controle (CCC) – chamados de *backhauls* – e entre as CCCs e as operadoras das redes fixas, principalmente nas regiões metropolitanas;

- Rede de distribuição de sinais de televisão – as operadoras de televisão regionais distribuem seus sinais, desde as centrais de geração até os pontos de difusão ou as unidades móveis de reportagem, para transmissões ao vivo, realizando *links* temporários;
- Rede privada das operadoras de sistemas de utilidade pública – utilizada para prover a comunicação de sinais de voz ou de dados de comando entre as subestações;
- Rede de distribuição dos provedores Internet – para interligarem seus assinantes de forma rápida e personalizada, ou para efetuarem a conexão de seus equipamentos centrais com seus provedores.

1.5 PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

1.5.1 HISTÓRICO

Conforme foi mencionado na introdução deste trabalho, as experiências de Guglielmo Marconi provaram que a atenuação sofrida em longas distâncias era menor do que predizia a teoria, para ondas que se propagassem ao longo da superfície de uma esfera. Em 1902, o inglês Oliver Heavyside e o engenheiro norte-americano Arthur Edwin Kennely [5] propuseram que as ondas de rádio poderiam atingir grandes distâncias com pouca atenuação, se sofressem reflexão nas camadas mais altas – a chamada ionosfera. Essa teoria conhecida como Kennely-Heavyside suportou todas as experiências até hoje e é a explicação do porquê do comportamento da ionosfera como um espelho, cuja altura é maior à noite e menor de dia, e de porque quanto mais alta a frequência, mais as ondas penetram na ionosfera. Esse efeito, Marconi percebeu quando transmitiu na frequência de 60kHz, considerada baixa, precisando de enorme energia, não somente pela baixa eficiência de seus equipamentos, mas pelas perdas ocasionadas nas baixas camadas da ionosfera. Se tivesse utilizado frequências maiores, as ondas penetrariam mais na ionosfera, refletindo como espelho nas camadas mais

altas, e, por conseguinte, atingiriam maiores distâncias, ou, de maneira análoga, atingiriam a mesma distância pretendida inicialmente com menor energia.

1.6 O MEIO DE TRANSMISSÃO

O meio de transmissão das ligações via rádio é composto pelo conjunto superfície terrestre e atmosfera, sendo o comportamento do sinal transmitido dependente das condições atmosféricas e do relevo do terreno em que o sinal propagado está inserido.

As características da atmosfera ao redor de todo o planeta são dinâmicas e variam com a temperatura, umidade e pressão, em uma dada região. A altitude em relação à superfície da Terra é outro fator que contribui para as alterações nas propriedades eletromagnéticas.

A atmosfera pode ser dividida em diversas regiões sobrepostas [6], a saber:

Troposfera – entre 0 e 15km – é onde ocorre a maior concentração do vapor d'água, e onde se formam as nuvens. Uma propriedade importante nessa faixa é que, na média, a temperatura diminui com a altura, e é transparente à radiação solar. Nesta camada o principal efeito na propagação das ondas de rádio é o da refração, que atua na trajetória das ondas com o aumento da velocidade de propagação, devido à elevação da altitude;

Tropopausa – entre 15 e 20km – nesta região a temperatura se mantém constante e depende do tipo de clima do local. Em regiões de clima tropical, ela pode apresentar espessura desprezível;

Estratosfera – entre 20 e 45km – aqui a temperatura aumenta com a altitude, devido à alta concentração de ozônio;

Estratopausa – entre 45 e 50km – a temperatura se mantém constante;

Mesosfera – entre 50 e 80km – nesta região novamente o fenômeno em que a temperatura decresce com a altitude a uma taxa de variação quase constante;

Mesopausa – entre 80 e 90km – a temperatura se mantém quase constante;

Termosfera - acima de 90km – a temperatura aumenta com a altura, atingindo valores elevados, dependendo da hora do dia. A influência da irradiação solar ocorre de forma acentuada nesta região, e com isso acontece a dissociação das moléculas gasosas em íons positivos e elétrons livres, favorecendo a ionização desta camada – daí a denominação de ionosfera – a camada onde encontra -se o melhor meio de condução de toda a atmosfera. Apresenta comportamento cíclico, a saber: diário, anual e solar. No primeiro ocorre a maior ionização durante o dia e menor à noite; no segundo, a ionização é bem maior no verão do que no outono.

1.7 PERCURSOS DE PROPAGAÇÃO

Analizando detalhadamente a propagação de uma onda eletromagnética através do percurso entre o transmissor e o receptor, têm-se os seguintes percursos de propagação, conforme a FIGURA 3:

- A – Caminho direto
- B – Refração das camadas Ionosféricas
- C – Reflexões do terreno
- D - Refração das camadas Troposféricas

Analizando a FIGURA 3, observa-se que o trajeto A é o que leva menos tempo entre as duas antenas. Os outros caminhos que a onda pode tomar são as reflexões fixas provocadas pelo perfil topográfico do terreno em C, as reflexões causadas por mudanças nas camadas troposféricas e nuvens em D ou nas camadas ionosféricas em B e assim por diante. Quando todas as ondas atingem a antena, elas são somadas, e o resultado final pode prejudicar o sinal originalmente transmitido. Cada um dos dois tipos de perturbação pode ter uma diferença no tempo em relação ao trajeto direto, resultando em soma ou subtração entre eles, dependente ou não da frequência.

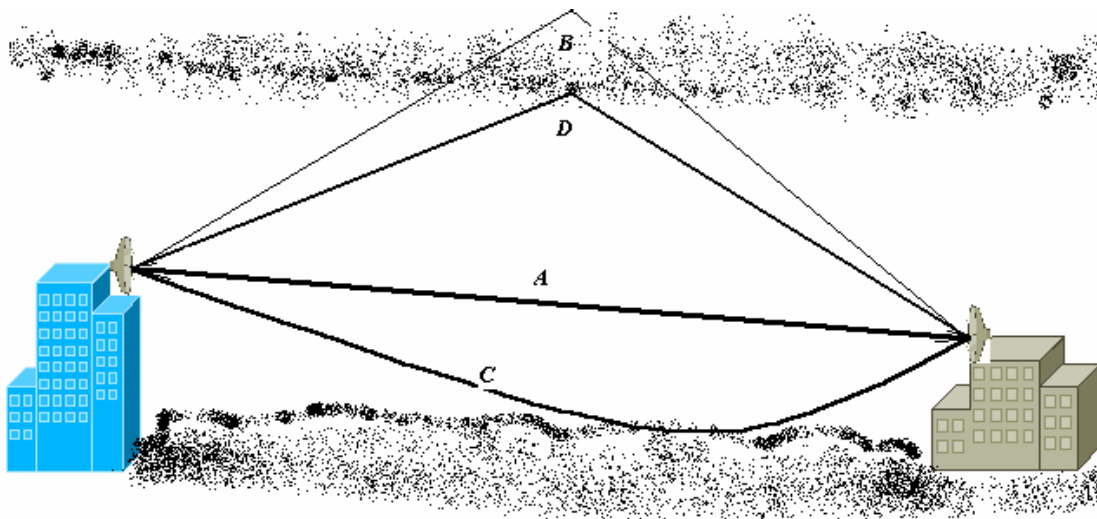


FIGURA 3 - Principais mecanismos de propagação

1.8 FENÔMENOS DA PROPAGAÇÃO

Quando uma onda eletromagnética viaja pelo espaço entre dois pontos, ocorrem alguns fenômenos – denominados de fenômenos da propagação, que passarão a ser analisados:

Desvanecimento – Uma onda eletromagnética, ao atravessar o meio de propagação, sofre alterações de amplitude e de percurso. O desvanecimento representa alterações percebidas por atenuações, reforços e distorções no espectro do sinal.

Difração – esse fenômeno ocorre quando existe um bloqueio de uma onda eletromagnética que se propaga entre o transmissor e o receptor de um rádio enlace, por um obstáculo opaco cujas dimensões sejam bem maiores que o comprimento de onda desse sinal. A difração acontece na borda do obstáculo onde as ondas são espalhadas, e como resultado, são atenuadas adicionalmente. O mecanismo da difração permite a recepção dos sinais de rádio, quando a condição de visada direta não é satisfeita, tanto em áreas rurais como em ambiente urbanos.

Dispersão ou Espalhamento – acontece quando existe um bloqueio de uma onda eletromagnética que se propaga entre o transmissor e o receptor de um rádio enlace, por um obstáculo cujas dimensões são comparáveis ao comprimento de onda deste sinal. A natureza deste fenômeno é similar ao da difração, exceto que as ondas eletromagnéticas são espalhadas em muitas direções. De todos os fenômenos aqui analisados, este é o mais difícil de ser previsto.

Reflexão – ocorre quando a onda de rádio se choca com um obstáculo cujas dimensões são consideradas maiores que o comprimento da onda incidente. A amplitude da onda refletida pode tanto ser maior ou menor do que o nível do sinal no ponto de recepção. Para os casos onde existam muitas ondas refletidas, o nível do sinal recebido tende a se tornar instável. Esse fenômeno é comumente referido como desvanecimento de multipercurso ou *multipath fading*.

Refração – Esse fenômeno acontece quando as ondas eletromagnéticas não se propagam em linha reta, mas se inclinam em relação à normal, devido ao índice de refração inconstante encontrado na atmosfera. Desta forma, a área de cobertura de um dado transmissor pode ser maior do que o teórico, mas cuidados devem ser tomados quanto a isso, pois existem flutuações nos parâmetros atmosféricos e, por conseguinte, haverá variação no nível da intensidade do sinal recebido.

Pelas definições acima descritas e retomando-se a FIGURA 3, notam-se as possíveis composições em que o campo total é formado ao alcançar uma antena receptora. A situação mais simples é a da transmissão de uma onda entre um transmissor e um receptor por visada direta, possível teoricamente em um ambiente completamente desobstruído. A atenuação deste sinal é geométrica, uma vez que a energia irradiada tende a se espalhar por esferas cada vez maiores. De acordo com a

recomendação ITU-R PN. 525-2 [7], a perda no espaço livre é calculada pela expressão:

$$L_{bf} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \right) \quad (1.1)$$

onde:

L_{bf} - perda no espaço livre (dB)

d – distância

λ – comprimento de onda, sendo que d e λ devem ser expressas na mesma unidade.

O cálculo pode ser feito também utilizando-se a frequência no lugar do comprimento de onda:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log (f) + 20 \log (d) \quad (1.2)$$

onde:

f – frequência [MHz] e

d – distância [km]

As ondas terrestres representam uma propagação que acompanha a superfície da terra, sofrem influência direta das características eletromagnéticas, do formato e do relevo do solo. Essas ondas são divididas em ondas de superfície – guiadas ao longo do contorno da terra, e as ondas espaciais, que percorrem a região logo acima da superfície da terra; é formada pelo campo da ligação em visada direta e pela onda que reflete no solo e contribui para a formação do sinal total no lado do receptor.

A onda de superfície representa a parcela do campo irradiado que se propaga ao longo do contorno da terra, acompanhando a sua estrutura física. A presença de obstáculos dá origem a reflexões, e parte dessa energia atinge a antena receptora, constituindo uma onda refletida. Portanto o sinal que alcança o receptor inclui parte da

energia refletida no solo na composição com a onda direta, conhecida como onda espacial.

As ondas ionosféricas alcançam a antena receptora após refletir ou propagar em um determinado trecho no interior da ionosfera, retornando em seguida à terra devido a dois mecanismos: um, nas faixas mais baixas de frequência, a onda reflete na base da ionosfera e no outro há uma refração continuada no meio, até o retorno. Embora sejam fenômenos diferentes, do ponto de vista da recepção, são encarados como reflexão na atmosfera. Para baixas frequências é possível alcançar até alguns milhares de quilômetros, ao passo que para frequências mais elevadas dirigidas a essa região perdem-se no espaço e não permitem a formação de enlace.

Nas ondas troposféricas, ocorrem variações acentuadas no índice de refração, acarretando mudanças na direção de propagação, podendo fazer com que a onda retorne a superfície da terra. Neste caso acontece a comunicação conhecida por tropodifusão. Propagações da onda direta na região da troposfera aplicam-se a enlaces nas altas faixas de frequência para distâncias entre dezenas e poucas centenas de quilômetros. As ondas de superfície propagam-se ao longo do contorno do solo e predominam em baixas frequências. Dependendo da frequência e da polarização, podem alcançar grandes distâncias ou não; a atenuação é acentuada quando se utiliza a polarização horizontal, por conseguinte com alcance menor do que na utilização da polarização vertical. Nos sistemas de comunicação em altas frequências deve-se desconsiderar a onda de superfície na composição do campo que atinge o receptor.

Portanto, sintetizando a explicação acima, para se compor um sinal que alcança o receptor em um rádio enlace, deve-se levar em conta o efeito das ondas troposféricas, ionosféricas e as terrestres ou de superfície, ocasionadas pelas ondas direta e a refletida.

1.9 FAIXAS DE PROPAGAÇÃO

As primeiras experiências com as ondas eletromagnéticas utilizavam grandes comprimentos de onda. A histórica experiência de Marconi relatado no capítulo 1 foi feita com um transmissor que operava na frequência de 820kHz (comprimento de onda de 366m); e a comunicação só foi completada no início da noite, pois durante o dia o alcance era menor. Verificou-se na época então que a diferença de alcance era menor entre o dia e a noite, quanto maior fosse o comprimento de onda transmitido. Os mecanismos de propagação utilizados para comunicações via rádio variam em função das faixas de frequência as quais são classificadas de acordo com os comprimentos de onda, conforme a TABELA 1:

TABELA 1 – Faixas de frequência

Limite de frequência	Compr. de onda - λ	Denominação	Obs.
30- 300 Hz	$10^4 - 10^3$ km	ELF	
300-3000 Hz	$10^3 - 10^2$ km	VF	Frequência da voz
3-30 KHz	$10^2 - 10$ km	VLF	Ondas muito longas
30-300 KHz	$10 - 1$ km	LF	Ondas longas
300- 3000 KHz	1000 – 100 m	MF	Ondas médias
3-30 MHz	100 – 10 m	HF	Ondas Curtas
30-300 MHz	10 – 1 m	VHF	Ondas muito curtas
300-3000 MHz	100 – 10 cm	UHF	Microondas
3-30 GHz	10 – 1 cm	SHF	Microondas
30-300 GHz	10 – 1 mm	EHF	Microondas
300-3000GHz	1 – 0,1 mm	Sem denominação	
3 a 375 THz	100 – 0,8 μ m	Infravermelho	Comunicações ópticas
375-790 THz	0,8 – 0,38 μ m	Luz visível	
790-22.500 THz	380 – 13,3 nm	Ultravioleta	

Dentro de cada faixa existem características específicas de mecanismos de propagação, assim resumidos:

- Faixa ELF – Faixa de frequência cujas ondas penetram razoavelmente no solo ou na água, portanto possui aplicações em comunicação com

submarinos e escavações de minas. As aplicações operam nesta faixa com transmissores de alta potência e grandes antenas;

- Faixa VLF – O mecanismo de propagação utilizado nesta faixa é a reflexão ionosférica, sendo considerado um ótimo condutor, pois induz pequena atenuação na onda refletida;
- Faixa LF – Até os 100kHz nesta faixa, que vai até os 300kHz, a reflexão ionosférica é utilizada, embora a atenuação na onda seja maior que a da faixa de VLF;
- Faixa MF – Acima de 100kHz, o mecanismo de propagação utilizado é o de ondas de superfície com menor atenuação que o da reflexão ionosférica;
- Faixa HF – Nesta faixa de frequência aparece o mecanismo da refração ionosférica, visto que em regiões mais próximas do transmissor ainda permanece a presença das ondas de superfície;
- Faixa de VHF em diante – Nestas faixas não se utiliza mais a refração ionosférica, pois as ondas refratadas não atingem o ângulo necessário até os limites da ionosfera para retornar à superfície terrestre. Acima de VHF são usadas antenas diretivas que concentram a energia em feixes mais estreitos, estabelecendo as ligações por meio da onda espacial direta entre as duas antenas – transmissora e receptora, formando sistemas em visada direta. Nas faixas de VHF e UHF é possível trabalhar com enlaces obstruídos, enquanto que nas faixas de SHF e EHF deve-se necessariamente ter visibilidade direta. No próximo capítulo serão abordados maiores detalhes sobre essas faixas, pois são os escopos do presente trabalho.

1.10 ZONA DE FRESNEL

Um conceito muito importante para a análise e desempenho de um rádio enlace nas proximidades da superfície da Terra é o de zona de Fresnel, que é um volume do espaço contido em um elipsóide, conhecido também como elipsóide de Fresnel, que tem posicionado em seus focos cada uma das duas estações de um enlace.

A FIGURA 4 permite a visualização deste conceito, mostrando a representação bidimensional da elipsóide.

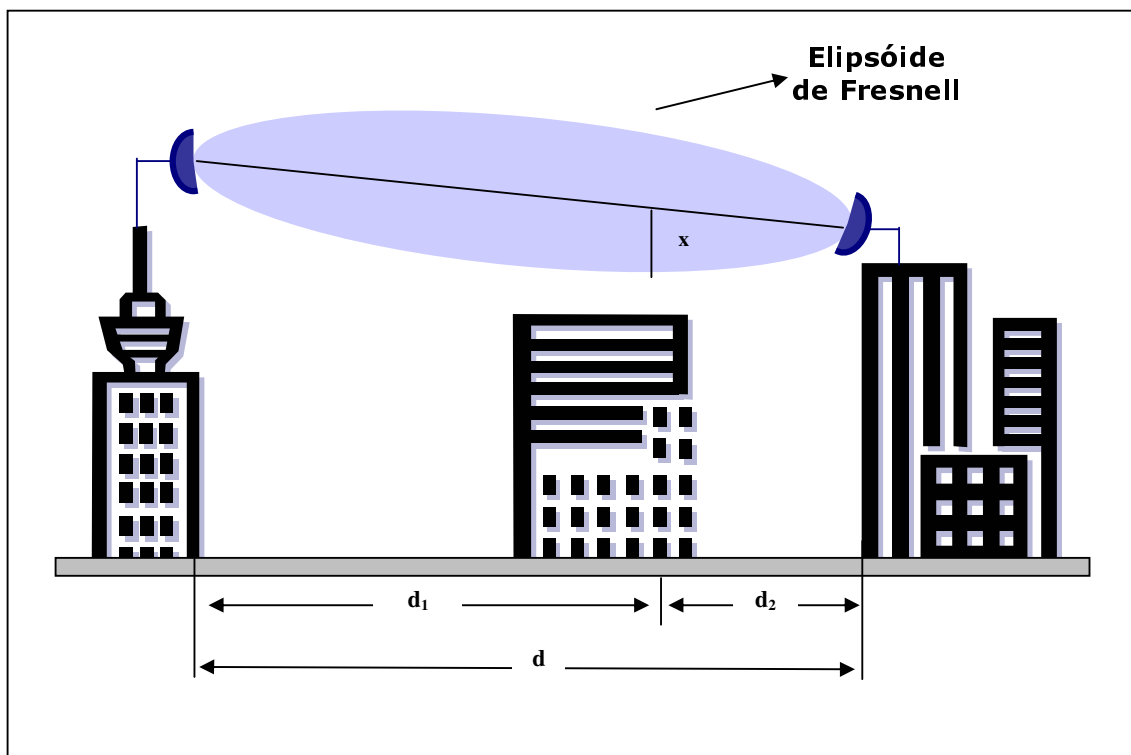


FIGURA 4 - Elipsóide de Fresnel

A superfície do elipsóide é definida pelo trajeto direto d por alguma quantidade fixa. Essa quantidade é função de λ e n , em que n é um número inteiro e positivo. Para a primeira zona de Fresnel, n é igual a 1 e o comprimento de trajeto difere em metade do valor de λ , que significa a reversão de fase em 180 graus em relação ao trajeto direto. Na prática, somente a primeira zona de Fresnel necessita ser considerada. Um rádio enlace terá a primeira zona de Fresnel livre se, conforme mostra a FIGURA 4, nenhum objeto for capaz de causar uma difração ao penetrar o elipsóide correspondente; é também denominado neste caso de visada direta. Esta denominação causa certo equívoco e para tal, deve-se fazer uma ressalva sobre a existência de diferença conceitual entre visada direta visual ou somente visada direta, que considera apenas a visibilidade óptica (visão a olho nu ou pelo uso de instrumentos ópticos tais

como o binóculo) entre as duas extremidades do enlace, e a rádio visão ou radiovisibilidade, que leva em consideração o conceito de Elipsóide de Fresnel e seus critérios de liberação das zonas de Fresnel.

A primeira zona de Fresnel é muito importante nos rádio enlaces, pois dependendo da porcentagem de que esta zona esteja livre de qualquer obstáculo, então a propagação pode ser considerada no espaço livre. Isto porque dentro do primeiro elipsóide de Fresnel, ou seja, no círculo central, as ondas se somam. Obstruir este círculo enfraquece a radiação entre **d**, como aparece na FIGURA 4. Portanto a radiação precisa de uma seção suficiente para a propagação e as radiações dos sucessivos anéis de Fresnel cancelam uma à outra, deixando a radiação do círculo central como sendo a principal e que não deve ser obstruída.

Para se calcular o raio da elipsóide de Fresnel em um ponto entre o transmissor e o receptor, a fórmula é:

$$R_f = 547,72 \sqrt{\frac{nd_1d_2}{(d_1 + d_2).f}} \quad (1.3)$$

sendo:

f : frequência [MHz]

d_1 e d_2 : distâncias [km] entre o transmissor e o receptor no ponto em que o raio da elipsóide é calculado.

Para o caso particular do cálculo do raio de Fresnel no ponto central do percurso:

$$R_f = \frac{1}{2} \sqrt{n\lambda d} \quad (1.4)$$

sendo:

n : número inteiro que caracteriza a ordem do raio de Fresnel

λ : comprimento de onda [m]

d : distância entre os dois pontos [m]

Outra situação particular interessante é quando se necessita calcular o raio de Fresnel próximo a uma das estações – transmissora ou receptora, ou quando $d_1 \gg d_2$. Então a expressão (1.3) fica reduzida a:

$$R_f = \sqrt{nd_2\lambda} \quad (1.5)$$

Portanto, todo o dimensionamento das alturas das torres e antenas é baseado no cálculo da porcentagem da liberação da primeira zona de Fresnel, conforme será visto nos próximos capítulos.

1.11 CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou algumas características básicas que são consideradas importantes para o projeto de um rádio enlace e que serão utilizadas no dimensionamento do sistema, tal como o cálculo da liberação da primeira zona de Fresnel. Foram apresentados os fenômenos de propagação de uma onda eletromagnética para a melhor compreensão do comportamento da mesma em espaço livre.

1.12 REFERÊNCIAS

- [01] SIQUEIRA, Ethevaldo. **Três momentos da história das telecomunicações no Brasil**. Dezembro Editorial. São Paulo, Brasil. 1997. 108 p.
- [02] PICQUENARD, Armel. **Complementos de telecomunicações**. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. 1976. 333 p.
- [03] NASCIMENTO, Juarez. **Telecomunicações**. Makron Books, São Paulo, Brasil. 2000. 340 p.
- [04] WALDMAN, Helio. YACOUN, Michel. **Telecomunicações: Princípios e Tendências**. Érica. São Paulo, Brasil. 1997. 287 p.
- [05] PEGRAM, T.W., MOLYNEUX-BERRY, R.B., BOSWELL, A.G.P. The Coherer Era. The Original Marconi System of Wireless Telegraphy. **GEC Review**, vol. 12, n. 2, 1997, pp. 83 – 116.
- [06] BARRADAS, Ovídio. **Sistemas em Radiovisibilidade**. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, Brasil. 1978. 693 p.
- [07] ITU – T. RECOMMENDATION ITU-R 525-2. **Calculation of Free-Space Attenuation**, ITU – T. Genebra, Suíça. 1994.
- [08] BONDYOPADHYAY, P.K. Introduction to radio communication. **Proceedings of the IEEE**, vol. 86, n. 10, pp. 2090-2109, Out. 1998.
- [09] CORAZZA, G.C. Marconi's history. **Proceedings of the IEEE**, vol. 86, n. 7, pp. 1307-1317, Jul. 1998.
- [10] PICKHOLTZ, R.L., SCHILLING, D.L., MILSTEIN, L.B. Theory of *Spread Spectrum* Communications-A Tutorial. **IEEE Transactions on Communications**, vol. COM-30, n. 5, pp. 855-884, Mai 1982.
- [11] IEEE-AS Standards Board, IEEE std 802.11, **LAN/MAN STANDARDS COMMITTEE of the IEEE Computer Society**, 528 p., ed. 1999 (R 2003).
- [12] ANATEL, Resolução n. 365 – Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita, **Anexo a Resolução n. 365**, 28 p., Mai. 2004.

CAPÍTULO 2

O PADRÃO 802.11

O protocolo 802.11 do IEEE consolidou a utilização das redes de acesso sem fio mundialmente, pois padronizou os equipamentos para este fim dos mais diversos fornecedores. Este capítulo apresenta a base do 802.11 e suas sub-famílias, definindo características e detalhes técnicos. Depois analisa a importância da utilização do espectro de frequências e a regulamentação da ANATEL pertinente.

2.1 INTRODUÇÃO

Os avanços nas comunicações dos últimos anos possibilitaram o surgimento de várias tecnologias, que desde então procuram atender a real necessidade de seus usuários, com a melhor qualidade possível. Nos últimos anos, a comunicação sem fio ganhou espaço considerável nas tecnologias de transmissão de dados, deixando de existir apenas nas comunicações de longa distância – (feitas através de satélites), para fazer parte de ambientes locais. Essa tendência foi fortalecida pelo investimento de instituições e empresas no sentido de aplicar a transmissão sem fio em ambiente computacional e na Internet.

As redes sem fio foram desenvolvidas originalmente para trabalhar com o tráfego de voz e não de dados. Os atrasos de menos de 100ms são exigidos para tráfego de voz a fim de se evitar os indesejados efeitos de eco, mas atrasos maiores podem ser tolerados para a transmissão de dados. Aliás, a idéia de se interligar computadores com a finalidade de trocarem dados eficientemente é relativamente nova. Surgiu nos anos 70 [1] com a forte tendência dos grandes sistemas chamados de *Mainframes* - predominante na década de 60. Depois foram substituídos gradualmente por sistemas menores – os microcomputadores, nas diversas filiais destas empresas. Dentro de cada filial, contudo, o alto custo dos periféricos de impressão e armazenagem criou a necessidade de compartilhar esses equipamentos entre os

usuários desses sistemas. Isso criou respectivamente os conceitos de rede WAN (*Wide Area Network*), conectando os minicomputadores das diferentes filiais, e rede LAN (*Local Area Network*), conectando os diferentes periféricos em uma mesma filial. Além disso, o desenvolvimento do microprocessador, no início da década de 70, acentuou a necessidade de interligar computadores, pois aumentaram o poder de processamento de dados em equipamentos menores e mais baratos, os microcomputadores. Logo, foi ficando claro para a indústria que as LANs seriam importantes nas próximas gerações de sistemas de processamento de dados e certamente seriam mais numerosas, vindo a requerer pesados investimentos para a padronização de redes de comunicação mais eficientes e de custo reduzido.

Desta forma houve uma parceria de algumas das maiores empresas de computação, para o desenvolvimento de uma rede de comunicação LAN, chamada de rede *ethernet*; que logo se tornou um dos mais conhecidos métodos para se conectar computadores, sendo esta utilizada como base para a sua padronização pelo IEEE – *Institute of Electrical and Electronic Engineers* em 1980, tornando-se o também conhecido como padrão 802.

Durante as décadas de 80 e 90 surgiram diversas variantes deste padrão, que define as regras básicas para o funcionamento da rede desde o meio físico de comunicações (cabos e fios de diversos tipos ou o próprio ar), passando pela identificação dos diversos pontos de rede (os endereços de cada computador) até as definições básicas de como transportar dados através do meio físico (controle de múltiplos pedidos – chamadas colisões).

2.2 REDES DE ACESSO LOCAL SEM FIO – WLAN

Uma rede de acesso local sem fio, doravante tratada como WLAN, é um sistema flexível de comunicação de dados capaz de oferecer acesso de um ponto a outro em uma rede independente da localização das estações de trabalho, utilizando ondas eletromagnéticas de alta frequência, infravermelho ou rádio frequência, minimizando a necessidade de conexão cabeada, ou oferecendo alternativa de conectividade para uma

topologia mista, como a ligação final entre a rede cabeada principal ou *backbone* existente e um grupo de computadores, dando ao usuário acesso a todos os recursos e serviços dentro de um campus ou edifício, por exemplo.

As WLAN se tornaram ao longo dos últimos anos uma importante solução de conectividade em todos os segmentos de negócios, dada a necessidade do ser humano em ter mobilidade com portabilidade no seu dia a dia. A rapidez de instalação aliada à flexibilidade em alterações de *lay out* e a escalabilidade de topologias nas redes WLAN fazem seus pontos fortes se comparada às redes cabeadas.

As redes WLAN podem operar de duas maneiras diferentes, a saber: o *ad-hoc* ou Infra-estrutura [2].

Na topologia *ad hoc*, também conhecida como *peer-to-peer*, todos os equipamentos de dados (chamados de *end-points*) que possuem placas de redes comunicam-se diretamente entre si. A FIGURA 5 apresenta este conceito. Como característica desta rede, destaca-se a simplicidade, pois não necessita de pré - configuração dos equipamentos e nem a do administrador do sistema.

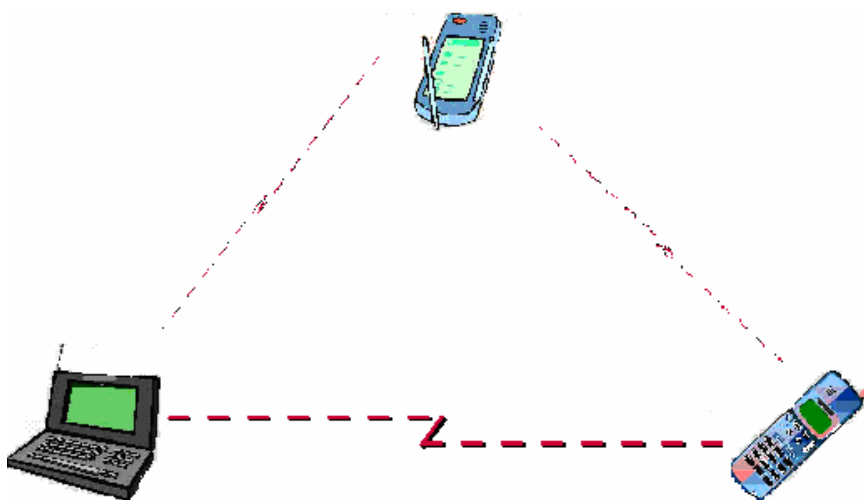


FIGURA 5 - Topologia de rede sem fio do tipo *ad hoc*

Já a configuração Infra-estrutura funciona na topologia em estrela, onde há uma unidade central, denominada de *access point*, que se comunica com todos os

pontos da rede (*end points*) e a adição de um ponto extra é feita aproximando-se o computador da área de cobertura, conforme pode ser visto na FIGURA 6.

Comparando as duas topologias, percebe-se que a configuração *ad hoc* é útil para colocar no ar rapidamente uma rede em salas de reunião ou qualquer lugar onde não hajam facilidades já instaladas, sendo que o alcance dos sinais de rádio frequência é o maior limitante deste tipo de configuração. Já na configuração Infra-estrutura, o alcance da rede é maior, principalmente quando se trata de andares de edifícios e salas comerciais, porém há o custo extra do equipamento *access point*.

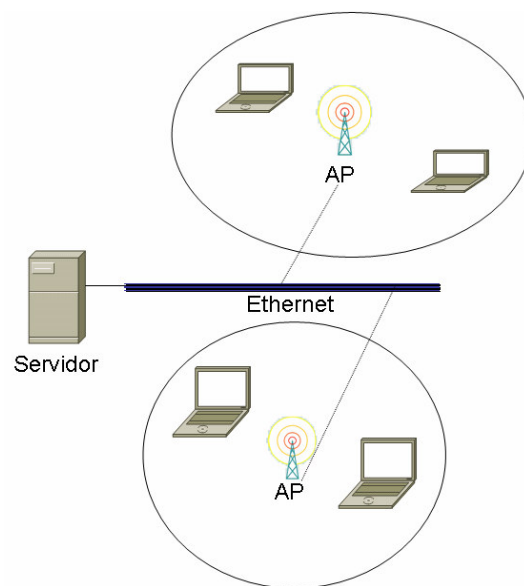


FIGURA 6 – Topologia de rede sem fio do tipo Infra-estrutura

Para expandir o alcance de uma rede WLAN, utilizam-se células, denominadas de microcélulas, similares as do sistema celular, permitindo maior conectividade em áreas maiores. A comunicação entre as microcélulas permite a continuidade da comunicação por parte do usuário, também de forma análoga ao sistema celular, denominado de *hand off*.

2.3 TECNOLOGIA DAS WLANs

Existem duas tecnologias possíveis para se implantar uma rede local sem fio, que estão diretamente relacionadas à largura da banda que esta irá operar:

- Banda Estreita (*Narrow Band*) – Opera em uma frequência de rádio específica, mantendo este sinal o mais limitado possível, o suficiente para passar as informações necessárias. As interferências indesejáveis entre os vários canais de comunicação podem ser evitadas com o planejamento cuidadoso entre os usuários nos diferentes canais de comunicação;
- Banda Larga (*Wide Band*) – Utiliza uma faixa considerável de frequência, diferentemente da tecnologia em banda estreita. Dentro desta categoria está a técnica baseada no Espalhamento Espectral ou SSM – *Spread Spectrum Modulation*, que foi concebido conceitualmente pela atriz americana Hedy Lamarr e o pianista George Antheil [3] em 1942, e desenvolvida para usos militares nos anos 50, devido a sua característica de segurança e confiabilidade na transmissão de informações confidenciais. O objetivo da codificação é transformar o sinal de informação para que ele fique parecido com ruído. O ruído branco tem uma densidade espectral de potência uniforme achatado, onde não existem picos aparentes, e pode ser reduzido ou eliminado por filtros [4].

Os sistemas de comunicações *Spread Spectrum* se distinguem dos sistemas de banda estreita pelo fato de que uma banda mais larga que a necessária é utilizada para enviar a informação. O novo sinal “espalhado” tem baixa densidade de potência, mas a mesma potência total do sinal [5]. A FIGURA 7 mostra como a transmissão *Spread Spectrum* difere da transmissão convencional a banda estreita.

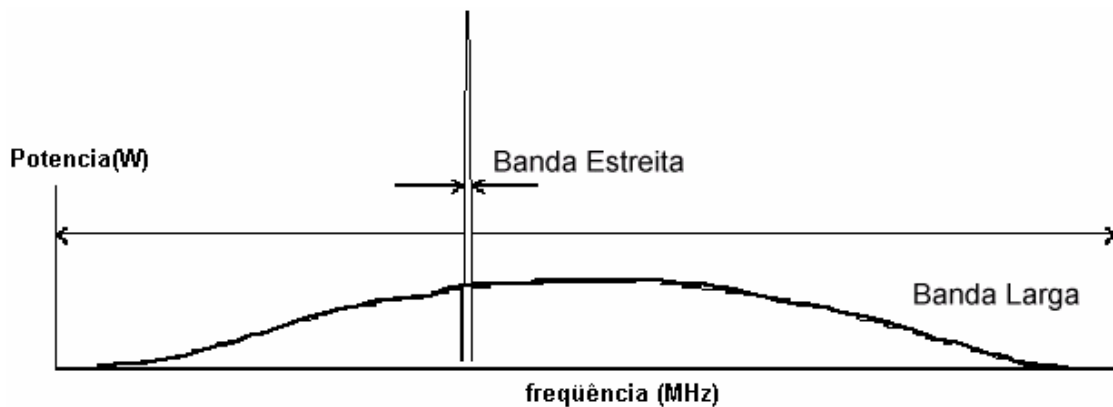


FIGURA 7 - *Spread Spectrum* x transmissão à banda estreita

Os sistemas de comunicações *Spread Spectrum* são caracterizados pelos seguintes conceitos [6]:

- O sinal transmitido ocupa uma banda que é muito maior que a banda mínima requerida para enviar a informação;
- Um sinal de espalhamento ou código, que é independente dos dados, é usado para espalhar os dados na banda utilizada para transmissão;
- Os dados são recuperados pelo receptor "correlacionando" o sinal recebido com um sinal sincronizado, que é a replica do sinal de espalhamento utilizado pelo transmissor;
- Baixa densidade espectral de potência: como o sinal é espalhado em uma banda de frequência muito larga, a densidade espectral de potência torna-se muito baixa, então outros sistemas de comunicação não sofrerão influências deste tipo de comunicação, permitindo com isso a coexistência de sistemas *Spread Spectrum* e de banda estreita em uma mesma canalização;
- Privacidade devido o uso de códigos pseudo-aleatórios. Isto significa que é muito difícil detectar as mensagens enviadas;
- A utilização de *Spread Spectrum* implica na redução de efeitos de *multipath*. O efeito *multipath* (múltiplos percursos) ocorre quando algumas ondas são refratadas pela atmosfera ou por barreiras, e há um

atraso na sua chegada com relação às ondas diretas. Este efeito costuma causar sérios problemas;

- Possibilidade de acesso aleatório: usuários podem iniciar sua transmissão em um tempo arbitrário com um código diferente, permitindo aplicações de acesso múltiplo;
- O principal parâmetro em um sistema *Spread Spectrum* é o ganho de processamento, que é a razão entre a banda de transmissão e a banda de informação; onde banda de transmissão é a banda utilizada para transmitir o sinal e banda de informação é a banda necessária para transmitir a informação. Para um sistema *spread spectrum* é vantajoso ter um ganho de processamento mais alto possível;
- O ganho de processamento (que é basicamente o fator de espalhamento) determina o número de usuários que podem ser permitidos em uma área, a quantidade de redução do efeito de *multipath*, a rejeição à interferência, a baixa probabilidade de interceptação do sinal. Estes fatores asseguram a transmissão e confiança do sinal transmitido, atendendo as necessidades deste projeto; além de mostrar porque os sistemas *Spread Spectrum* têm sido usados por muitos anos pelos militares.

Existem três formas distintas de *Spread Spectrum*, denominadas: Sequência Direta ou *Direct Sequence*, Saltos de Frequência ou *Frequency Hopping* e Saltos no Tempo ou *Time Hopping*; também podem ser utilizados modelos híbridos destes. Serão analisadas as duas primeiras formas de *Spread Spectrum*, pois o *Time Hopping* é extremamente vulnerável a ruído e só deve ser usado em combinação com o *Frequency Hopping*.

2.4 SALTO EM FREQUENCIA OU FHSS

Em um sistema com salto em frequência ou *Frequency Hopping* (FH), a informação simplesmente pula de um canal de frequência para outro, de forma codificada no tempo, conforme apresenta a FIGURA 8. Cada bloco de cor diferente

indica uma comunicação distinta, saltando em frequências diferentes dentro de uma dada banda.

Desta forma, o receptor só poderá encontrar o sinal nos vários canais se souber onde sintonizar, sabendo previamente as posições de frequência onde o transmissor vai saltar [7]. O código *FH* que determina a sequência dos saltos de frequência é gerado por um circuito chamado gerador de pulsos pseudo-aleatórios (*PN – pseudo-noise*). O mesmo código deve ser usado e sincronizado no transmissor e no receptor, obtido através do sinal piloto de sincronismo.

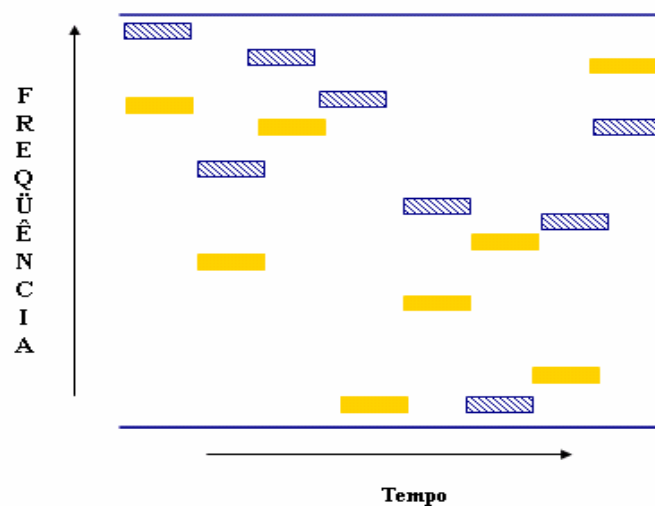


FIGURA 8 - Princípio de funcionamento de um sistema FH

Dois tipos de técnicas de *Frequency Hopping* podem ser distinguidos: *Fast Frequency Hopping* no qual o período do salto de frequência é menor que o período do símbolo a ser transmitido, *Slow Frequency Hopping* no qual o período do salto de frequência é maior que o período do símbolo.

2.5 SEQÜÊNCIA DIRETA – DSSS

Em um sistema *Spread Spectrum* de Seqüência Direta ou *Direct Sequence* (DS), a codificação é implementada pela mistura da informação com um sinal de código de alta taxa de bits [8]. O sinal codificador para a *DS* é gerado por um circuito similar ao empregado no *FH*, e é recuperado no receptor, empregando um código similar ao do

transmissor, e sincronizado com o mesmo, conforme mostra a FIGURA 9. Notar a presença de um sinal de interferência na transmissão e a anulação da mesma no lado do receptor.

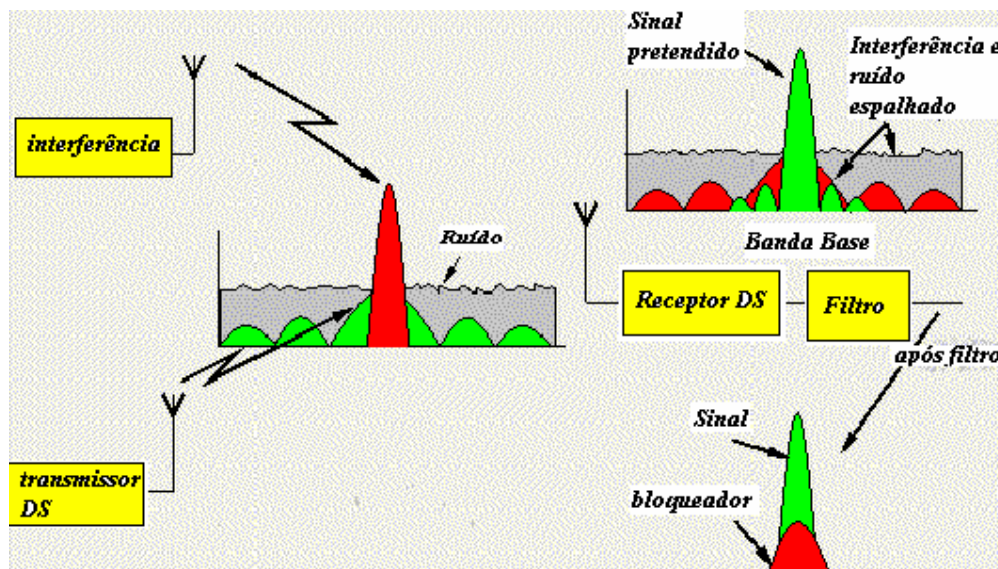


FIGURA 9 - Princípio de funcionamento de um sistema DS

Assim, potenciais sinais interferentes que chegam ao receptor são espalhados na frequência pelo mesmo processo que recupera o sinal desejado. Deste modo o receptor consegue recuperar a informação mesmo na presença de sinais interferentes de faixa estreita, e com densidades de potências muito maiores que a do sinal desejado.

2.6 O PROTOCOLO 802.11

A ampla aceitação das redes em geral, com ou sem fio, no mercado residencial e corporativo depende da normalização da indústria para garantir a compatibilidade e confiabilidade do produto entre os vários fabricantes. Foi analisando essa característica que o *IEEE* no início dos anos 80 submeteu o padrão *Ethernet* na versão 10Mbps ao seu comitê plenário para padronização, denominado de 802, de redes de comunicações locais [9]. O *IEEE* adotou então a *Ethernet* como um dos seus padrões, publicado como 802.3.

Desde então, vários outros comitês internos ao IEEE foram formados, e em 1990 foi constituído o grupo de trabalho de Normas para as Redes Locais sem fio, denominado 802.11, com a tarefa de desenvolver padrões globais para equipamentos de rádio e redes sem fio que operassem nas faixas de frequência denominadas de não licenciadas ou livres, ou seja, que não necessitam de aquisição de licença ou autorização dos órgãos oficiais (no caso do Brasil, a ANATEL) para funcionamento.

Os membros desta Comissão consistem em profissionais de empresas e universidades, que são pesquisadores, fabricantes - de semicondutores, computadores, equipamentos de rádio – provedores, instaladores e usuários dos produtos de redes sem fio. O grupo é globalmente representado por representantes dos Estados Unidos, Canadá, Europa, Israel entre outros.

Em 1997 foi aprovado o primeiro de vários protocolos, denominado de 802.11b, e em 1999 viriam o 802.11a e o 802.11g⁵.

A norma original criada para operar em uma taxa de transferência de dados de 1 a 2Mbps, utiliza a tecnologia de Seqüência Direta em Espalhamento Espectral – DSSS. Em julho de 1998, o grupo de padronização decidiu selecionar a técnica OFDM como base para seu novo padrão, objetivando uma transmissão de dados na faixa de 6 a 54Mbps, sendo o primeiro a utilizá-la em comunicações baseadas em pacotes.

2.6.1 ESPECIFICAÇÕES DO PROTOCOLO 802.11

O objetivo do grupo de trabalho do *IEEE* em especificar o protocolo 802.11 não é a de especificar tecnologia ou implementação, mas de definir um nível físico para as redes no qual as transmissões sejam realizadas na frequência de rádio ou infravermelhas - as especificações da Camada Física – PHY, e um protocolo de controle e acesso do meio - da Camada de Enlace – MAC, que definem a arquitetura básica da rede sem fio do protocolo 802.11, o qual será analisado a seguir.

⁵ A letra depois do 802.11 indica a ordem na qual a norma foi proposta e não quando ela é publicada.

2.6.2 ARQUITETURA DA REDE

A arquitetura adotada pelo grupo de trabalho 802.11 [10] consiste em vários componentes que interagem para prover uma rede local sem fio com suporte a mobilidade de estações de modo transparente para as camadas superiores. Baseia-se na divisão da área coberta pela rede em células, que são as chamadas BSA – *Basic Service Area* ou áreas do serviço básico. Um grupo de estações que se comunica por radiodifusão ou infravermelho em uma BSA constitui um BSS – *Basic Service Set* ou conjunto de serviço básico.

O tamanho ou o alcance de cada área depende do ambiente e dos equipamentos de rádio utilizados. Para permitir a construção de redes cobrindo áreas maiores do que uma célula, múltiplas BSAs podem ser interligadas por meio de um sistema de distribuição ou DS – *Distribution System* com ou sem fio, via pontos de acesso, ou *Access Point* – AP. Os pontos são estações especiais responsáveis pela captura das transmissões realizadas pelas estações de sua BSA, destinadas a estações localizadas em outras BSAs, retransmitindo-as utilizando o sistema de distribuição. Os BSAs interligados por um sistema de distribuição, por meio dos APs, definem uma ESA – *Extended Service Area* ou área de serviço estendido. Os usuários desta rede são denominados de STA – *Wireless LAN Stations* ou estações da rede local sem fio.

O conjunto de estações formado pelos vários BSSs interligados por um sistema de distribuição define um ESS – *Extended Service Set* ou conjunto de serviços expandido, identificado por um ESS-ID, que o identifica. Dentro de um ESS, cada BSS é também identificado com um BSS-ID. Estes dois identificadores formam o *Network-ID* ou o identificador da rede sem fio IEEE 802.11. Um ESS formado pela conexão de múltiplos BSSs constitui uma rede local sem fio com infra-estrutura, que consiste nas estações especiais denominadas pontos de acesso ou APs. O sistema de distribuição, além de interligar os vários APs fornece os recursos necessários para interligar a rede sem fio a outras redes. Na FIGURA 10 é apresentada a arquitetura básica do protocolo 802.11 no modo Infra-estrutura.

As funções básicas dos pontos de acesso são:

- Autenticação, Associação/Reassociação - permite que uma estação móvel, mesmo saindo de sua célula de origem, continue conectada à infraestrutura e não perca a comunicação;
- Gerenciamento da Potência - possibilita as estações operarem economizando energia, através de um modo chamado de *power save* ou economia de potência;
- Sincronização da rede - garante que as estações associadas a um AP estejam sincronizadas por um relógio comum.

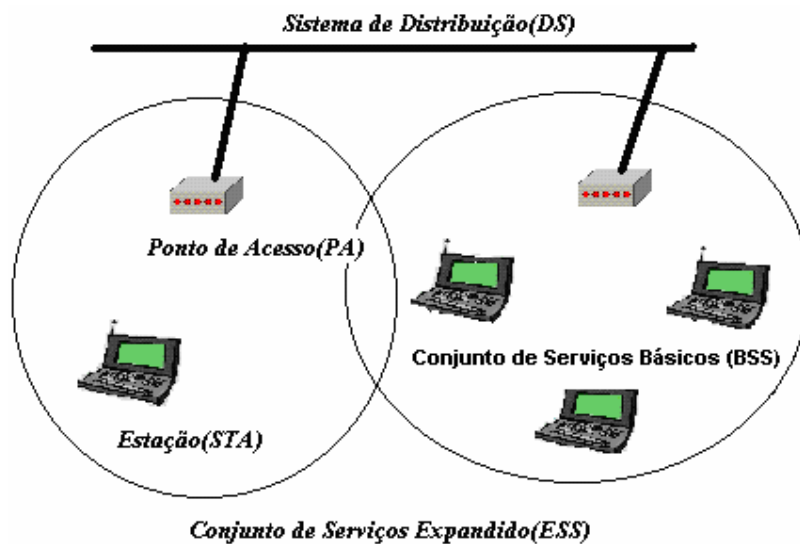


FIGURA 10 – Arquitetura básica do 802.11

2.6.3 A CAMADA FÍSICA - PHY

O padrão 802.11 define três tipos de camada física: espalhamento espectral por salto em frequência – FHSS, Espalhamento Espectral por Sequência Direta – DSSS e infravermelho. Todas as camadas físicas do 802.11 incluem a provisão de um sinal de avaliação de canal livre (*Clear Channel Assessment Signal – CCA*) que é utilizado na subcamada MAC para indicar se o meio está livre.

O FHSS é uma técnica de espalhamento espectral que divide a banda passante total em vários canais de pequena banda e faz com que o transmissor e o receptor fiquem em um desses canais por um determinado tempo e depois saltem para outro canal. Com isso permite-se a coexistência de várias redes em uma mesma área através da separação dessas redes por diferentes padrões pseudo-aleatórios de uso do canal chamados seqüências de saltos. Utiliza a faixa de frequência de 2,4 a 2,4835GHz, sendo o primeiro canal com uma frequência central de valor igual a 2,402GHz e os canais subsequentes separados por 1MHz, ocupando uma faixa de passagem típica de 83MHz; o que lhe dá um ganho de processamento de 10,4 dB⁶. Cada canal possui uma banda de 1Mbps e três diferentes conjuntos com 26 seqüências de saltos são definidos. As diferentes seqüências de saltos permitem que vários BSSs coexistam em uma mesma área geográfica e os três conjuntos de saltos existem para evitar períodos de colisão entre diferentes seqüências de saltos em um conjunto.

O acesso básico de 1Mbps utiliza uma modulação gaussiana por chaveamento de frequência ou GFSK – *Gaussian Frequency Shift Keying*, de dois níveis, na qual o dado passa por um filtro Gaussiano em Banda Base e é modulado em frequência (Um *bit* 1 lógico é codificado usando uma frequência $F_c + f$ e um 0 lógico usa uma frequência $F_c - f$). A taxa de acesso opcional de 2Mbps usa um GFSK de quatro níveis, no qual dois *bits* são codificados por vez usando quatro frequências.

O DSSS é um método alternativo de espalhamento espectral e apresenta uma taxa básica de 1Mbps gerada através de uma modulação diferencial binária por chaveamento de fase ou DBPSK – *Differential Binary Phase Shift Keying*, e uma taxa de 2Mbps quando utiliza uma modulação diferencial quaternária por chaveamento de fase ou DQPSK – *Differential Quadrature Phase Shift Keying*. O espalhamento é feito através da divisão da banda disponível em 11 subcanais, cada um com 11MHz e do espalhamento de cada símbolo de dados usando uma seqüência de 11chips dada por:

⁶ O ganho é definido como a taxa de espalhamento de dados.

$$+1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, -1, -1. \quad (3.1)$$

Os BSSs sobrepostos ou adjacentes podem operar ao mesmo tempo sem interferências se a distância entre as frequências centrais de cada BSS é de pelo menos 30MHz. Logo, somente dois BSSs sobrepostos ou adjacentes podem ser utilizados sem interferência.

As regras de limites de potência, tanto para o DSSS, como para o FHSS, variam globalmente e serão abordados com mais detalhes para o Brasil no item 2.8.2. Nos EUA, a FCC⁷ – órgão regulamentador das Telecomunicações em sua seção 15, definiu que o ganho máximo da antena é limitado a 6dBi e a potência máxima irradiada é de 1W.

A especificação da onda infravermelho utiliza comprimentos de onda de 850nm a 950nm com potência máxima de 2W. O infravermelho foi projetado para ser utilizado em áreas fechadas e opera com transmissões não direcionadas com alcance máximo de aproximadamente 10m caso não existam fontes de calor ou luz do sol interferindo ou, 20m caso sejam utilizados receptores mais sensíveis. As estações podem receber dados em suas linhas de visada e por transmissões refletidas. A codificação da taxa básica de 1Mbps é realizada através de uma modulação por posição de pulso – PPM ou *16-Pulse Position Modulation*, na qual 4bits de dados são mapeados em 4bits codificados para transmissão.

Os padrões 802.11a [11] e 802.11b [12] alteram a camada física do 802.11 para prover taxas de transmissão mais altas. O padrão 802.11b [3] especifica taxas de transmissão mais altas na banda de 2,4GHz, através da alteração de alguns pontos da norma 802.11. Taxas de 1, 2, 5.5 e 11Mbps são providas neste padrão através da utilização de um chaveamento de código complementar ou CCK – *8-chip Clomplementary Code Keying* no DSSS. O padrão 802.11a utiliza a banda de 5GHz para poder prover bandas de até 54Mbps. Esse padrão também altera a norma básica 802.11 em alguns pontos. A camada física utiliza o OFDM, que trabalha com 52

⁷ FCC – Federal Comission of Communications ou Comitê Federal de Comunicações.

subportadoras moduladas por BPSK ou QPSK, modulação do tipo 16-QAM ou 64-QAM.

2.6.4 A CAMADA DE ENLACE

O padrão 802.11 define que a camada de enlace é subdividida em duas subcamadas, sendo a primeira para o Controle de Acesso ao Meio ou MAC – *Media Access Control* e a segunda para o Controle de Enlace Lógico ou LLC – *Logical Link Control*. A FIGURA 11 mostra a arquitetura definida pela 802.11, que acompanha o modelo de referência do modelo de interconexão de sistemas abertos OSI – *Open System Interconnection*.

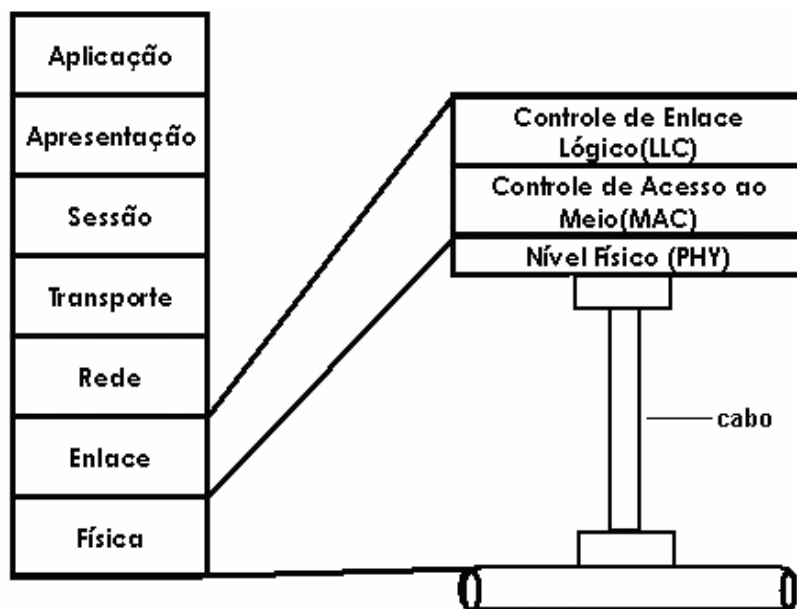


FIGURA 11 – Modelo OSI para o 802.11

Desta forma, existem dois modos de operação para o 802.11. O primeiro chamado DCF (*Distributed Coordination Function*) – função de coordenação distribuída que não utiliza nenhum tipo de controle central e o segundo é o PCF (*Point Coordination Function*) – função de coordenação de ponto, que utiliza uma estação

central para controlar todas as ações nas células sob seu domínio. Todas as implementações devem operar com o DCF, mas com o PCF é opcional.

Com o DCF, a especificação do MAC – Controle de acesso ao meio é similar a 802.3, que define o padrão *Ethernet* para redes tradicionais. O protocolo 802.11 utiliza um esquema de acesso múltiplo CSMA/CA, que evita colisões ao invés de detectá-las somente, com o algoritmo usado na 802.3. É impossível detectar colisões em redes com transmissões por rádio frequência e por essa razão deve-se evitá-las. O controle de acesso ao meio opera juntamente ao meio físico amostrando a energia sobre o meio de transmissão.

A camada física utiliza um algoritmo para determinar se o canal está limpo (CCA), medindo a energia de RF junto à antena e determinando a duração do sinal recebido. O sinal medido é denominado RSSI. Se o sinal recebido tem comprimento maior que um determinado limiar, a transmissão de dados é feita de acordo com as regras de cada protocolo. O padrão provê outra opção, que é a de utilizar apenas o CCA; nesse modo a detecção da portadora pode ser usada pelos transmissores baseados na 802.11. O melhor método depende dos níveis de interferência no meio de operação do sistema.

O protocolo CSMA/CA permite opções que podem minimizar as colisões utilizando as seguintes sinalizações: permissão para enviar – RTS, limpo para enviar – CTS e reconhecimento – ACK. A comunicação é estabelecida quando um dos nós sem fio envia uma curta mensagem de RTS. O RTS inclui o destino e o tamanho da mensagem e a duração da mensagem é conhecida como o vetor de alocação da rede – NAV, que alerta todos os outros no meio, para não transmitirem durante um determinado intervalo de tempo. A estação receptora envia um CTS para todos os transmissores. Se o CTS não for recebido, assume-se que houve uma colisão e reenvia-se um RTS. Depois que os dados forem recebidos, um ACK é enviado de volta para garantir o sucesso da transmissão.

Na FIGURA 12 é mostrada a comunicação entre a estação A e B, quando há uma obstrução, evitando assim a recepção da estação C com A, que por sua vez não pode determinar quando o canal está ocupado ou livre. Então as estações A e C podem

tentar transmitir no mesmo tempo que a estação B. As utilizações das seqüências de dados RTS, CTS e ACK ajudam a prevenir o rompimento causado por este problema.

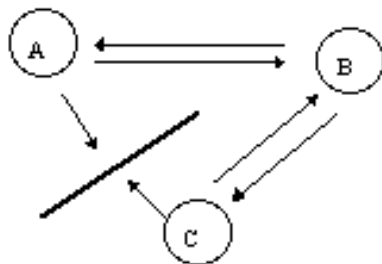


FIGURA 12 – Esquema de funcionamento do CSMA/CA

No modo DCF, os quadros podem ser fragmentados em partes menores, sendo que cada parte contém o seu próprio total de verificação, ou seja, estes fragmentos são individualmente numerados e confirmados com a utilização de protocolos do tipo *stop and wait*. Depois que uma conexão é feita sob a forma RTS e CTS, vários fragmentos são enviados em seqüência, denominado de rajada de fragmentos, aumentando desta forma a velocidade de transmissão e fazendo com que as retransmissões sejam restringidas a fragmentos defeituosos, em vez do quadro todo.

Esta fragmentação de quadros em transmissões ponto-a-ponto é a responsável pela remontagem do quadro que torna o processo transparente para a camada superior. O padrão obriga que todos os receptores tenham suporte a fragmentação, mas deixa como opcional a fragmentação nos transmissores.

Já no modo de operação do tipo PCF, em que a estação central efetua o controle, não ocorre colisão, sendo que o padrão 802.11b descreve o mecanismo de controle, mas não a freqüência, nem a ordem ou mesmo se todas as estações necessitam de atendimento igual.

Os modos DCS e PCF foram projetados para operarem juntos dentro de uma mesma célula. Foi definido o intervalo de tempo entre os quadros para que isso fosse

possível. Após o envio de um quadro, existe um tempo de inatividade definido pelo padrão, para que qualquer outra estação envie um quadro. São definidos 5 intervalos com finalidades bem distintas, detalhadas a seguir.

O SIFS (*Short Interframe Space*) – é o espaçamento curto entre quadros, para a permissão da transmissão prioritária às partes de um único diálogo; é o intervalo que apresenta a menor duração de tempo. O segundo intervalo mais curto é o Slot Time, que é definido como uma unidade de tempo para as operações necessárias ao protocolo MAC. Os outros 3 intervalos são o PIFS (*Priority Interframe Space*) – espaçamento entre quadros PCF, o DIFS (*Distributed Interframe Space*) – espaçamento entre quadros DCF e o EIFS (*Extended Interframe Space*) – espaçamento estendido entre quadros.

Esclarecendo, o SIFS seria a permissão para que um receptor envie um CTS como resposta a um RTS, deixando ao receptor o envio de um ACK relativo a um fragmento ou todo o quadro de dados, deixando o transmissor de uma rajada de fragmentos enviar o próximo, sem ter de mandar um RTS novamente. Existirá sempre uma estação habilitada a responder após um intervalo SIFS, e se caso deixar de fazer uso de seu tempo e decorrer um tempo PIFS, a estação central envia um quadro de *polling*, permitindo a uma estação transmitir um quadro ou sequência de fragmentos sem a interferência de outro, oferecendo à estação central a oportunidade utilizar o canal quando o anterior terminar, sem ter de disputar com outros usuários.

Se a estação central não transmitir nada e decorrer um tempo DIFS, qualquer outra estação pode se apresentar para enviar um quadro. O EIFS só é utilizado por estações que receberem um quadro defeituoso ou não conhecido, para informar esta ocorrência. A FIGURA 13 apresenta esquematicamente estes intervalos, dos quais destacam-se os seguintes pontos:

- 1 – até este ponto quadros de controle ou o próximo fragmento pode ser enviado;
- 2 – neste ponto os quadros PCF podem ser enviados;
- 3 – aqui os quadros DCF podem ser enviados;
- 4 – a recuperação de quadros defeituosos é feita neste ponto.

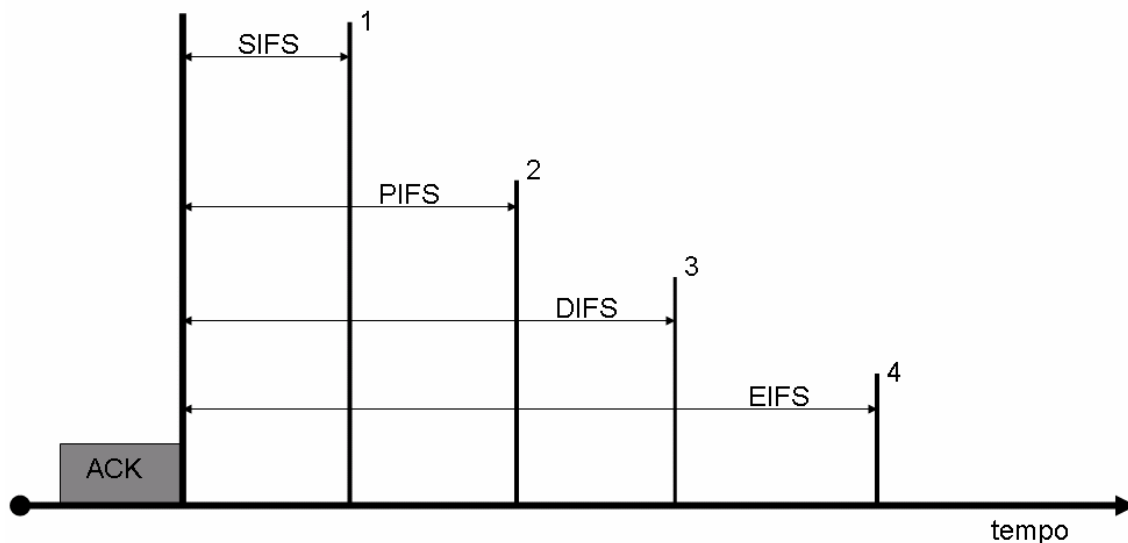


FIGURA 13 – Espaçamento entre quadros no 802.11

A norma do 802.11b que utiliza a tecnologia em *Spread Spectrum* na Sequência Direta – *DSSS*, define que o valor para o SIFS e o *Time Slot* é de 10 e 20 μ s respectivamente, sendo que para este último, foi escolhido de tal forma a levar em conta o sinal de propagação e o atraso de processamento. Para o PIFS, seu valor é o do SIFS acrescido ao valor do *Time Slot*, enquanto que para o DIFS, vale SIFS acrescido de duas vezes o *Time Slot*. Já para o EIFS, seu valor é maior que quatro SIFS.

A FIGURA 14 apresenta o espaçamento de quadros para o modo DCF, onde uma estação hipotética quer transmitir algum quadro, ouve o meio (detecta ou não a portadora) e caso esteja livre após determinado tempo DIFS, a estação transmite. Se não, a transmissão é adiada e inicia-se o *backoff*, no qual a estação escolhe um tempo aleatório uniformemente distribuído entre zero e o tamanho da janela de contenção (CW), evitando colisões, e cria um temporizador de *backoff*. Este temporizador é decrementado periodicamente quando o meio está livre por mais de DIFS segundos e nenhuma estação transmite. O período de decremento é dado pelo tempo de *slot* correspondente ao atraso máximo de ida e volta dentro de um BSS. O temporizador é parado quando alguma transmissão for detectada no meio. Quando temporizador

expira, a estação envia o seu quadro. A estação receptora utiliza o método de verificação cíclica (CRC) para detectar erros e caso o quadro pareça correto, envia um quadro de reconhecimento (ACK) se o meio estiver livre por um tempo SIFS. Caso a estação transmissora não receba o ACK, deduzirá que houve uma colisão, escalonará uma retransmissão e entrará no processo de *backoff*.

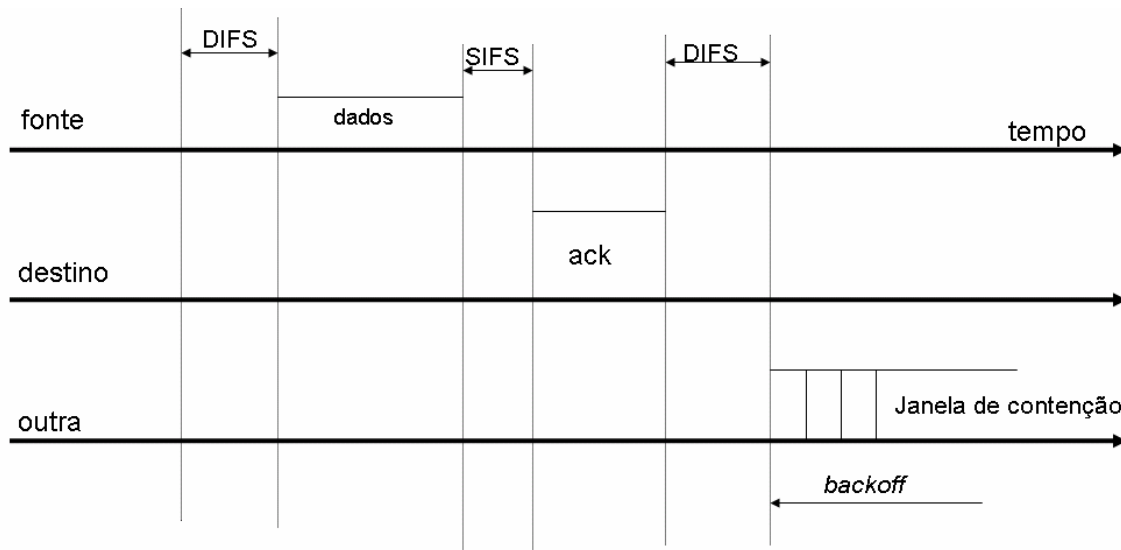


FIGURA 14 – Esquema básico de acesso no DCF

O outro tipo de DCF que é opcional inclui quadros RTS e CTS para evitar os já comentados problemas gerados por terminais ocultos, e é apresentado na FIGURA 15. A detecção da portadora é feita pelos mecanismos físicos CCA e virtual, que utiliza uma reserva do meio através da troca de quadros RTS e CTS antes do envio do dado, que possuem informações sobre o nó de destino e de um tempo relativo ao envio do quadro de dados e de seu respectivo ACK. Uma estação envia um RTS para reservar o meio, após perceber que este está livre em pelo menos DIFS segundos, ao receptor antes da transmissão de um quadro. O receptor responde com um CTS, após o meio estar livre por SIFS segundos, caso esteja pronto para receber. Todas as estações que detectarem o RTS, o CTS ou ambos, irão utilizar a informação de duração relativa ao quadro de dados para atualizar o NAV, que é utilizado para uma detecção virtual da portadora. Qualquer terminal oculto poderá adiar a transmissão para evitar colisões.

Ao receber o CTS e esperar o meio se tornar livre por SIFS segundos, o transmissor inicia o envio do quadro, como no DCF básico. Caso não receba o CTS, o transmissor entra na fase de *backoff* e retransmite o RTS.

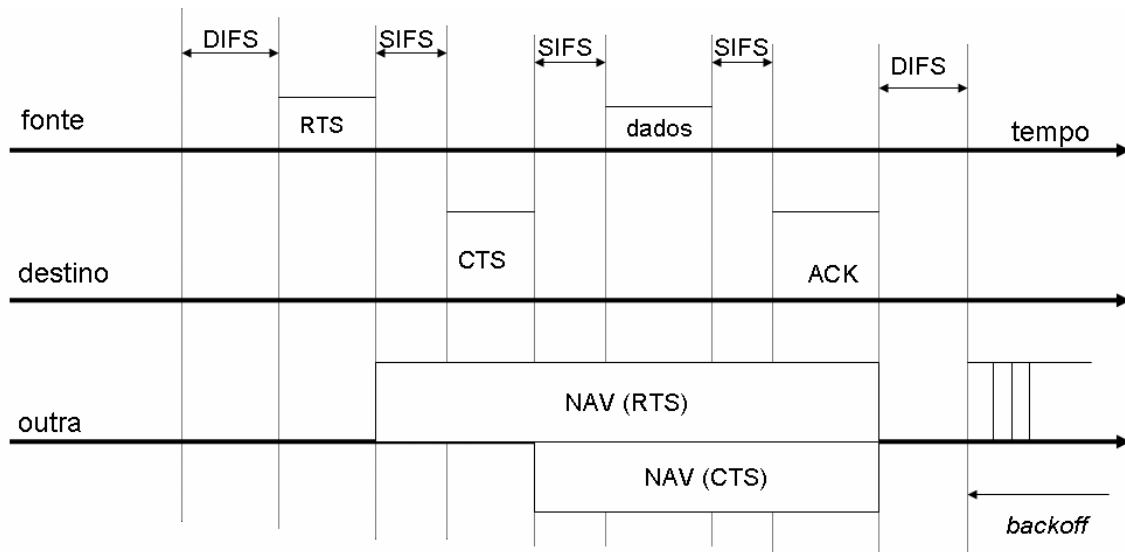


FIGURA 15 – DCF utilizando RTS e CTS

O padrão também especifica modos para proteção de dados, por intermédio de uma complexa técnica de criptografia conhecida como algoritmo WEP - *Wired Equivalent Privacy*, que consiste em proteger o sinal transmitido utilizando uma chave de 64 bits juntamente com o algoritmo de codificação RC4 – uma chave simétrica de 128 *bits* de tamanho, dificultando que outras estações consigam extrair da sequência as informações enviadas. Também são estabelecidas funções que permitem o gerenciamento da sequência das informações enviadas e o gerenciamento da energia, de modo que as estações possam ficar durante um certo período definido pela estação base no modo espera – *stand-by*.

Os serviços MAC definem em termos funcionais, quais serviços providos pelo IEEE 802.11 para o LLC e camadas superiores, incluindo facilidades para transmissão e recepção de unidades de pacotes de dados ou PDU – *Packet Data Units*, e provê informações do estado em que se encontra por operação, para utilização pelos

procedimentos de recuperação de erros das camadas superiores. O serviço provido esconde dos usuários os detalhes da subcamada MAC e PHY.

2.6.5 A FAMÍLIA 802.11

O padrão IEEE 802.11 é uma família de especificações desenvolvidas para as redes locais sem fio – WLAN e, assim como o 802.3, todas as tecnologias 802.11x utilizam os mesmos padrões de MAC e quadros de transmissão, mas existem variantes nos níveis PHY.

Os primeiros padrões lançados mundialmente em 1999 foram o 802.11a, o 802.11b e o 802.11g, os quais serão analisados.

2.6.6 O PROTOCOLO 802.11a

Ao contrário do que a letra sugere, o 802.11a é um padrão mais recente que o 802.11b, pois embora ambos tenham sido propostos pelo IEEE na mesma época, o 802.11b foi finalizado antes e por isso chegou ao mercado com mais de seis meses de antecedência do 802.11a. Este protocolo especifica a transmissão de rádio na faixa de 5GHz, também denominada nos EUA e criada pela FCC, sem exigência de licença para acesso a Internet, de UNII – *Unlicensed National Information Infrastructure* ou Infraestrutura de Informação Nacional não licenciada, e apresenta 3 sub-bandas, a saber:

- UNII 1 – banda inferior – de 5,15 a 5,25GHz;
- UNII 2 – banda média - 5,25 a 5,35GHz;
- UNII 3 – banda superior - 5,75 a 5,85GHz.

Perfazendo um total de 300MHz de largura de banda e possui até oito canais sem sobreposição, quando as faixas UNII 1 e UNII 2 estiverem ocupadas. As velocidades de comunicação podem chegar até 54MHz, e utilizada a tecnologia de Modulação OFDM. A Potência máxima especificada é de 50mW para a faixa UNII 1, 250mW para UNII 2 e 800mW para a faixa UNII 3.

2.6.7 O PROTOCOLO 802.11b

A transmissão neste caso ocorre na faixa de frequência de 2,4 a 2,4835GHz, dividida em 14 canais de 22MHz, perfazendo um total de 83,5MHz de largura de banda e 3 canais sem sobreposição, também conhecida nos EUA como ISM – *Industrial, Scientific and Medical Band* ou Banda Médica, Científica e Industrial, cujas faixas de frequência são, além das já citadas acima, 902 a 928MHz e 5,725 a 5,850GHz. A Modulação utilizada para esta sub-família é o DSSS, que permite trafegar dados a uma taxa de até 11Mbps em distâncias de até 50 metros, devido à característica deste tipo de modulação. Embora ela tenha sido inicialmente concebida como uma tecnologia para WLANs em ambientes fechados e com claras restrições da potência de saída, o 802.11b é também utilizado atualmente em rádio enlaces ponto-a-ponto (PP) e ponto-multiponto (PMP) em redes sem fio nas áreas metropolitanas e rurais, com a utilização de antenas de alto ganho.

Esse protocolo também é conhecido coloquialmente como “Wi-Fi” - Wireless Fidelity ou fidelidade sem fio, em alusão a idéia de que os sistemas sem fio não apresentam confiabilidade e nem segurança, pois ele apresenta um mecanismo de criptografia por chave pública, denominado WEP – *Wired Equivalent Privacy* ou Privacidade equivalente às redes com fio, que se destina a fornecer as redes sem fio o mesmo nível de segurança das redes convencionais. O funcionamento se dá da seguinte forma: o cliente tenta conectar-se a um ponto de acesso (AP), que por sua vez envia um valor para a estação que usa a sua chave pública para criptografá-lo e depois devolve ao AP para verificação. A chave criptográfica apresenta um tamanho de 40 bits, mas já existem chaves com 128 bits.

2.6.8 O PROTOCOLO 802.11g

Em junho de 2003, quatro anos após o lançamento e amadurecimento dos primeiros protocolos – 802.11a e b, o terceiro padrão foi lançado. O 802.11g opera também na faixa de 2,4GHz e modulação em DSSS, assim como o 802.11b, mas

apresenta uma taxa de transmissão superior, da ordem de 54Mbps, e procura combinar as vantagens da modulação OFDM para altas taxas, com a compatibilidade dos padrões de camada física anteriores.

Os equipamentos compatíveis com o Protocolo 802.11g podem operar diretamente com os equipamentos 802.11b, obviamente com taxas de transmissão de 11Mbps ou inferiores. Além disso, os pontos de acesso 802.11b poderão ser atualizados com uma mudança do *software* residente e assim trabalhar na mesma taxa de transmissão de dados que o 802.11g.

Dentro de sua faixa de trabalho, cada equipamento 802.11g consome um terço da banda passante disponível, o que permite configurar até 3 sistemas com frequências diferentes, operando sobre o mesmo espaço físico. Mas ressalta-se que o 802.11a, em compensação, é capaz de trabalhar com 12 sistemas operando com frequências diferentes no mesmo espaço físico e com menor interferência, por operar na faixa menos poluída que é a de 5GHz.

A TABELA 2 apresenta um quadro comparativo entre os protocolos apresentados.

TABELA 2 – Comparativo entre as subfamílias do 802.11

PROTOCOLO IEEE	802.11	802.11 a	802.11 b	802.11g
Faixa de frequência(GHz)	2,4	5,8	2,4	2,4
Largura de banda(MHz)	83,5	300	83,5	83,5
Taxa de transmissão máx.(Mbps)	2	54	11	54
Interface Aérea	DSSS/FHSS	OFDM	DSSS	OFDM/DSSS
Número de canais	3	12	3	3
Alcance Médio(m)	50	80	100	150

2.6.9 O PROTOCOLO 802.11n

Enquanto alguns novos protocolos estão em fase final de liberação para o mercado pelo IEEE - 802.11d, 802.11e, 802.11f, 802.11h e 802.11i, em janeiro de 2004 o órgão formou um novo grupo de trabalho para a categoria 802.11, a fim de desenvolver uma emenda a esse padrão. A taxa de transmissão deste novo protocolo

será de no mínimo 100Mbps, o que exigirá um nível de transmissão bruto ainda maior na camada PHY, e oferecerá um alcance operacional maior que os padrões atuais. A data prevista para a conclusão deste novo protocolo é para o final do ano de 2006.

2.7 O ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS

Há menos de 25 anos os serviços móveis eram considerados serviços locais providos para um grupo fechado de assinantes. Desde então a tecnologia tem feito o possível para desenvolver sistemas móveis de comunicação pessoal.

A necessidade da oferta de serviços que adequem a mobilidade e a conveniência para os sistemas existentes em curto espaço de tempo, são alguns dos fatores que contribuíram com o significativo aumento do número de assinantes móveis pelo mundo.

Um outro aspecto que contribui para a continuidade desta expansão é a convergência das aplicações de dados e voz, por exemplo, os usuários do serviço da *Internet* já acessam as redes de comunicações sem fio e esperam obter de seus telefones móveis os mesmos serviços disponíveis pelas redes fixas.

O acesso a *Internet* pelas redes sem fio irão representar o mesmo crescimento que o mercado apresentou quando do lançamento da telefonia móvel de voz, oferecendo assim um acesso à alta taxa de dados com preços acessíveis a todos. A introdução em breve dos sistemas celulares de terceira geração (3G) pelas operadoras, tornará isso possível, pois serão serviços avançados multimídia em banda larga.

Dada a importância que as comunicações móveis representam para a infraestrutura das telecomunicações modernas, torna-se imperioso identificar e definir, claramente, as faixas de frequências corretas para estas novas aplicações e considerar os aspectos regulatórios relacionados ao gerenciamento do espectro.

Assim, o espectro de frequência é um recurso escasso do ponto de vista físico – limitado tecnicamente e, por conseguinte oneroso, pela consideração de que quanto mais alta for a frequência utilizada mais cara serão as soluções, devido à complexidade técnica dos componentes empregados para a fabricação de circuitos eletrônicos e

dispositivos dos sistemas irradiantes. E não se deve esquecer a questão social, onde o espectro é um bem público, que deve ser bem gerenciado por um órgão regulador governamental que promova a utilização de forma otimizada e universalizada, oferecendo a oportunidade da utilização de todas as classes, para o crescimento de uma nação.

2.8 EQUIPAMENTOS DE RADIAÇÃO RESTRITA

Dispositivos de radiação restrita são aqueles cuja emissão de radiação na frequência utilizada produz um campo eletromagnético com intensidade dentro dos limites estabelecidos no regulamento sobre equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita. A conformidade com estes limites é atestada por um processo de certificação que deve ser homologado pela ANATEL.

Desde que tenham a sua certificação homologada pela ANATEL, estes equipamentos podem ser utilizados sem necessidade de autorização de uso ou licença de funcionamento da estação. Os equipamentos de radiação restrita operam em caráter secundário e, portanto não tem direito a proteção contra interferências prejudiciais provenientes de qualquer outra estação de radiocomunicação e nem causar interferência em qualquer sistema operando em caráter primário. Além disso, todo equipamento de radiação restrita deve ser projetado para assegurar que nenhuma outra antena além daquela com ele fornecida possa ser utilizada, exceto quando estabelecido o contrário explicitamente na regulamentação.

2.8.1 CONDIÇÕES GERAIS DE USO PARA A RADIAÇÃO RESTRITA

Os limites de emissão que caracterizam um equipamento de radiação restrita são classificados de acordo com as condições de uso, que são:

- Condições gerais de uso, que estabelece frequências e seus respectivos limites a serem atendidos por todos os equipamentos que pretendam serem caracterizados como de radiação restrita;

- Condições específicas de uso que estabelece limites de emissão alternativos aos das condições gerais (menos restritivos) para equipamentos de radiação restrita destinados a aplicações específicas e operando em determinadas faixas de frequências.

A TABELA 3 apresenta as aplicações específicas para as quais o regulamento estabelece limites de emissão alternativos aos das condições gerais (menos restritivos) dentro das faixas de frequências de operação.

TABELA 3 – Tipos de equipamento de radiação restrita (fonte: ANATEL)

Seção Regul.	Equipamentos de Radiação Restrita para aplicações específicas	Frequências (MHz)
I	Dispositivos de Operação Periódica (equipamento que opera de forma descontínua)	40,66-40,70 > 70
II	Equipamentos de Telemedicação	88-108
II	Microfone sem Fio	54-72 76-88 88-108 174-216 470-608 614-806
III	Equipamentos de Telemedicação Biomédica (equipamento usado para transmitir medidas de fenômenos biomédicos humanos ou animais para um receptor, dentro de uma área restrita)	174-216 512-566
III	Sistemas de Comunicações de Implantes Médicos (MICS)	402-405
IV	Equipamentos de Telemedicação de Características de Material	890-907,5 915-940
V	Emissor-Sensor de Variação de Campo Eletromagnético, exceto sistemas de proteção de perímetro. (Dispositivo que estabelece um campo eletromagnético em sua vizinhança e detecta mudanças naquele campo como resultante do movimento de seres vivos ou objetos dentro de sua faixa de atuação)	902-907,5 915-928 2435-2465 5785-5815 10500-10550 24075-24175
V	Sistema de Proteção de Perímetro (emissor-sensor de variação de campo eletromagnético que emprega linhas de transmissão de rádio frequência como fonte de radiação e que são instaladas de tal forma que permitem ao sistema detectar movimentos dentro da área protegida)	40,66-40,70 54-72 76-88
V	Sensor de Variação de Campo Eletromagnético instalados em veículos e utilizados como sistemas de radar de veículo	46700-46900 76000-77000
VI	Dispositivo de Auxílio Auditivo (aparelho usado para prover auxílio auditivo a pessoa ou grupo de pessoas com deficiência)	72,0-73,0 74,6-74,8 75,2-76,0
VII	Sistemas de Telefone sem Cordão (sistema consistindo de dois transceptores, um sendo uma estação base fixa que se conecta à rede telefônica pública comutada e a outra uma unidade terminal móvel que se comunica diretamente com a estação base)	43,7-47 48,7-50 902-907,5 915-928

VIII	Sistemas de Ramal sem Fio de CPCT (sistema consistindo de uma estação base fixa que se conecta à Central Privada de Comutação Telefônica (CPCT) e unidades terminais móveis que se comunicam diretamente com a estação base)	864-868 994-948 1910-1930
IX	Equipamentos Utilizando Tecnologia de Espalhamento Espectral (Espalhamento Espectral (Spread Spectrum): tecnologia na qual a energia média do sinal transmitido é espalhada sobre uma largura de faixa muito maior do que a largura de faixa que contém a informação)	902-907,5 915-928 2400-2483,5 5725-5580
X	Sistemas de Acesso sem Fio em Banda Larga para Redes Locais	5150-5350 5470-5725
XI	Equipamento de Localização de Cabos (dispositivo usado de forma não contínua com o objetivo de localizar cabos, linhas, dutos e elementos ou estruturas similares enterrados)	9-490 KHz
XII	Sistemas de Identificação Automática de Veículos	2900-3260 3267-3332 3339-3345,8 3358-3600
XIII	Sistemas de Telecomando em geral (Telecomando: uso das telecomunicações para a transmissão de sinais de rádio para iniciar, modificar ou terminar, à distância, funções de equipamento)	26, 27
XIII	Sistemas de Telecomando utilizados por portadores de Certificado de Operador de Estações de Rádioamador (COER)	50, 53
XIII	Sistemas de Telecomando para operação de aeromodelos	72
XIII	Sistemas de Telecomando para operação de modelos de superfície	75
XIV	Equipamento de Radiocomunicação de Uso Geral (unidade portátil com capacidade de transmissão bidirecional para comunicação de voz)	462,53-462,74 467,53-467,74
XV	Sistemas Rádio de Baixa Potência Operando em 19 GHz	19165 - 19255
XVI	Sistema de Sonorização Ambiental	225-270
XVII	Equipamento Bloqueador de Sinais de Radiocomunicações (BSR) (equipamento destinado a restringir o emprego de rádio frequências ou faixas de rádio frequências específicas para fins de comunicações)	-

Não há a necessidade de autorização para utilizar frequências no Brasil quando se opera com equipamentos que possuam certificação homologada pela ANATEL, com a designação de radiação restrita. Tais produtos que recebem esta certificação são aqueles que atendem as condições gerais de emissão do regulamento sobre equipamentos de radiocomunicação restrita ou destina-se a aplicações específicas que tem limites alternativos menos restritivos também definidos pelo regulamento. A existência desta categoria de equipamentos simplifica o processo de

autorização para operação dos mesmos como se pode observar pelas várias aplicações específicas abrangidas.

2.8.2 RESOLUÇÃO ANATEL N.º 365/2004

A resolução número 365 publicada pela ANATEL no dia 10 de maio de 2004, que substituiu a de número 305 de 26 de julho de 2002, aprova o Regulamento sobre equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita.

Este regulamento tem por objetivo caracterizar os equipamentos de radiação restrita e estabelecer as condições de uso de rádio frequência para que possam ser utilizados com dispensa da licença de funcionamento de estação e independentes de outorga de autorização de uso de rádio frequência.

De forma a tornar o estudo do presente capítulo o mais objetivo possível, serão restringidas as informações específicas das condições para a utilização da radiação restrita referente ao escopo deste trabalho, ou seja, enlaces ponto-a-ponto para a faixa de 2,4GHz e cuja aplicação está detalhada na Tabela 3, seção regulamentada número IX, que é a do Rádio *Spread Spectrum* (Espalhamento Espectral).

No capítulo II do regulamento - das condições gerais, na tabela III encontra-se a definição da faixa de frequência em estudo, que é de 2.400 a 2.483,5MHz e os valores limites de intensidade de campo média, medidos a uma distância de 3 metros. A intensidade de campo da frequência fundamental é de até 50mV por metro e a intensidade de campo de harmônicos é de até 500µV por metro. A intensidade de campo de pico de qualquer emissão não deve exceder o valor médio especificado por mais de 20dB.

No capítulo III do regulamento - das condições específicas de uso, a seção IX especifica os equipamentos que utilizam a tecnologia de espalhamento espectral ou outras tecnologias de modulação digital para as faixas de 902 a 907,5MHz, 915 a 928MHz, 2400 a 2483,5MHz e 5725 a 5850MHz. Para a frequência em estudo – 2400 a 2483,5MHz, ressaltam-se resumidamente as seguintes condições:

- As aplicações podem se dar nas topologias ponto-a-ponto e ponto-multiponto;
- Só poderá ser utilizada a tecnologia de Espalhamento Espectral ou a Multiplexação Ortogonal por divisão de frequência – OFDM;
- Nesta faixa as condições não valem para os equipamentos cujas estações utilizem potência E.I.R.P..⁸ superior a 400mW, em localidades com população superior a 500.000 habitantes. Para este caso onde a frequência deve ser licenciada, existe a Resolução número 397, de 6 de abril de 2005, que é detalhada no item 2.8.3;
- Os equipamentos utilizados no rádio-enlace devem ser homologados e certificados pela ANATEL, ou seja, devem cumprir os requisitos do Regulamento para Certificação e Homologação de Produtos para Telecomunicações, aprovado pela Agência;
- Os sistemas devem utilizar 15 frequências de salto não coincidentes no mínimo;
- O tempo médio de ocupação não deve ser superior a 0,4 segundos em qualquer frequência em um intervalo de 0,4 segundos multiplicado pelo número de canais de salto utilizado;
- Pode-se evitar ou suprimir transmissões nos sistemas em uma frequência particular de salto, desde que no mínimo 15 canais não coincidentes de salto sejam utilizados;
- A potência de pico máxima de saída do transmissor é limitada em 125mW, para sistemas que utilizam menos de 75 frequências de salto e 1W para sistemas com 75 ou mais frequências de salto;
- Para sistemas que utilizam a técnica de modulação digital do tipo sequência direta, a largura de faixa deve ser no mínimo de 500kHz a 6dB;
- A potência máxima de pico na saída do transmissor não pode ser superior a 1W;

⁸ Potência equivalente isotropicamente irradiada.

- Para a densidade espectral de potência, o seu valor máximo não deve exceder a 4dBm em qualquer faixa de 3kHz durante qualquer intervalo de tempo em transmissão contínua, para estações que utilizem potência E.I.R.P. igual ou inferior a 400mW, em localidades com população superior a 500 mil habitantes;
- Para a utilização na topologia ponto-a-ponto pode-se empregar antenas de ganho direcional superior a 6dBi, desde que a potência de pico máxima na saída do transmissor seja reduzida de 1dB a cada 3dB que o ganho direcional da antena exceder a 6dBi.

2.8.3 RESOLUÇÃO ANATEL N.º 397/2005

A resolução número 397 publicada pela ANATEL no dia 6 de abril de 2005 [13], que aprova o Regulamento sobre as condições da utilização de rádio frequências na faixa de 2.400 a 2.483,5MHz por equipamentos com a tecnologia de Espalhamento Espectral ou tecnologia de Multiplexação Ortogonal por divisão de frequência, tem por objetivo estabelecer as condições de utilização nas estações que utilizem a potência E.I.R.P. superior a 400mW, em localidades com população superior a 500 mil habitantes. Na Tabela 4 encontram-se resumidamente estes valores.

Tabela 4 – Valores para os equipamentos de radiação restrita

Regulamento Aplicável	E.I.R.P.	População (habitantes)	Licenciamento das estações
Resolução 397 6/4/2005	> 400mW	> 500mil	SIM
Resolução 365 10/5/2004	< 400mW	> 500mil	NÃO
	> 400mW	< 500mil	NÃO
	< 400mW	< 500mil	NÃO

Este regulamento deixa claro que na situação considerada acima, em relação ao tamanho da população e da faixa de potência, existe a necessidade do licenciamento das estações, diferente do que é considerada na resolução 365, analisada no item 1.32..2. De forma análoga a resolução 365, esta também define a operação como de caráter secundário, ou seja, não existe direito a proteção contra interferências prejudiciais provenientes de qualquer outra estação de radiocomunicação e nem podem causar interferência em qualquer sistema operando em caráter primário.

As características técnicas definem que o serviço pode ser utilizado tanto na topologia ponto-a-ponto, como ponto-multiponto.

Para os sistemas que utilizam a modulação digital do tipo salto em frequência com menos de 75 frequências de salto, a potência de pico máxima de saída do transmissor não deve ser superior a 0,125W; com um número maior ou igual a 75 frequências de salto a potência de pico máxima não deve ser superior a 1W.

Para os sistemas que utilizam a modulação do tipo sequência direta no Espalhamento Espectral ou a Multiplexação Ortogonal por Divisão de Frequência – OFDM, a potência de pico máxima de saída do transmissor não pode ser superior a 1W.

Para as aplicações ponto-a-ponto, pode-se lançar mão das antenas de transmissão com ganho direcional superior a 6dBi, desde que a potência de pico máxima na saída do transmissor seja reduzida de 1dB a cada 3dB que o ganho direcional da antena exceder a 6dBi.

2.9 FREQUÊNCIAS LICENCIADAS E FREQUÊNCIAS NÃO LICENCIADAS

Ao escolher o meio de transmissão para uma rede, o profissional se depara com questões como qualidade, confiabilidade e custos. A decisão entre as tecnologias com ou sem fio é complexa e recai sobre a detalhada análise de vários fatores tais como a distância entre os pontos a serem conectados, a capacidade de informação a ser enviada, a topografia da região ou o tempo necessário para a implantação entre outros.

Uma vez definida a solução sem fio, deve ser analisado qual o tipo de solução segundo o parâmetro faixa de frequência.

2.9.1 FREQUÊNCIAS LICENCIADAS

Os enlaces de rádios licenciados são aqueles que utilizam faixas ou canais de frequências predeterminadas para uso exclusivo de um operador para uma dada região, licenciada pelos órgãos de regulamentação de seus respectivos países, como no Brasil é a ANATEL, a fim de se evitar qualquer interferência mútua.

As redes de microondas autorizadas raramente sofrem interferência, mas se isso acontecer, o problema é normalmente resolvido com assistência da agência reguladora. Assim existe segurança por parte da empresa que se utiliza deste enlace ao saber que o canal designado é para seu uso exclusivo, dentro de uma área geográfica, e que as comunicações essenciais não serão prejudicadas por interferências de outras empresas.

2.9.2 FREQUÊNCIAS NÃO LICENCIADAS

Os enlaces não licenciados utilizam faixas que podem ser utilizadas por qualquer tipo de usuário, sem a necessidade de obtenção de autorização prévia do órgão regulador para a utilização da frequência, dentro de uma mesma região. Desta forma, mesmo que seja obtida uma transmissão livre de interferências na instalação, não há qualquer garantia de que continue desta forma durante todo o tempo de operação do *link*. Ou seja, se houver uma ou várias fontes de interferências que possam surgir a qualquer instante e provocar a degradação do desempenho do enlace ou a redução da disponibilidade, deverá ser detectada e anulada a fonte desta interferência. Quanto mais sinais interferentes no local, mais difícil se tornará a probabilidade do enlace se manter disponível. Mesmo sendo projetados para suportar determinados níveis de interferências, os equipamentos não suportam as mais severas. Para se evitar as surpresas logo no início da implantação, deve-se realizar um rastreamento de rádio

nos arredores do local da instalação, para se assegurar a detecção de quaisquer fontes permanentes ou intermitentes de interferência.

Em regiões metropolitanas onde o espectro se encontra congestionado, deve-se utilizar antenas diretivas, de forma a reduzir a quantidade de sinais interferentes que possam atingir o enlace.

2.10 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram abordados os conceitos da técnica do Espalhamento Espectral, requisitos básicos para a compreensão do protocolo 802.11 da IEEE para as redes de acesso sem fio.

Em seguida foram descritas as atividades da ANATEL, órgão regulamentador das telecomunicações no Brasil, com relação às redes de acesso sem fio. Foram apresentadas as comparações quando da utilização de frequências licenciadas e não licenciadas, demonstrando que existem vantagens e desvantagens na utilização dos mesmos, onde para as frequências não licenciadas tem-se que a agilidade e custo são os pontos fortes, porém com detrimento a confiabilidade do enlace.

2.11 REFERÊNCIAS

- [01] TANENBAUM , Andrew. **Redes de computadores**. Campus. São Paulo, Brasil. 2003. 945 p.
- [02] BERNAL, Paulo Sérgio. **Comunicações Móveis: Tecnologias e Aplicações**. Érica. São Paulo, Brasil. 2002. 204 p.
- [03] HONG, H.Y. A Starlet's Secret Life as Inventor. **IEEE Microwave Journal**, vol. 42, n. 2, pp. 70-74. Fev. 1999.
- [04] SCHOLTZ, R.A. The Origin of Spread Spectrum Communications. **IEEE Transactions on Communications**, vol. COM-30, n. 5, pp. 39-44, Mai. 1982.
- [05] DIXON, R.C. Why spread spectrum. Reprint from **IEEE Communications Society Magazine**, vol. 13, pp. 21-25, Jul. 1975.
- [06] UTLAUT, W.F. Spread Spectrum Principles and Possible Application to Spectrum Utilization and Allocation. **ITU Telecom Journal** , vol. 45, pp. 20-32, Jan 1978, reprint from IEEE Communications Society Magazine, vol.16, n. 5, pp. 21-31, Set. 1978.
- [07] SPASOJEVIC, Z., BURNS , J. Performance Comparison of Frequency Hopping and Direct Sequency Spread Spectrum Systems in the 2,4GHz Range. **IEEE Communications Magazine**, vol. 39, n. 10, pp. 124 – 132, Out. 2001.
- [08] SCHILING, L.D. Spread Spectrum for Personal Communications. **IEEE Microwave Journal**, pp. 26-33. , Set. 1991.
- [09] NEE, R; AWATER, G. New High-Rate Wireless LAN Standards. **IEEE Communications Magazine**, vol. 37, n. 12, pp.82-88, Dez. 1999.
- [10] IEEE-AS Standards Board, IEEE Std 802.11 - WIRELEES LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications, **LAN/MAN STANDARDS COMMITTEE of the IEEE Computer Society**, 528 p., ed. 1999 (R 2003).
- [11] IEEE-AS Standards Board, IEEE Std 802.11 - WIRELEES LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-Speed Physical

- Layer in the 5 GHz Band. **LAN/MAN STANDARDS COMMITTEE of the IEEE Computer Society - IEEE Standard 802.11a** , 91 p., ed. 1999 (R 2003).
- [12] IEEE-AS Standards Board, IEEE Std 802.11 - WIRELESS LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band. **LAN/MAN STANDARDS COMMITTEE of the IEEE Computer Society - IEEE Standard 802.11b**, 96 p., ed. 1999 (R. 2003).
- [13] ANATEL, Resolução n. 397 – Regulamento sobre Uso de Radiofrequências na Faixa de 2.400MHz a 2.483,5MHz por Espalhamento Espectral ou Tecnologia de Multiplexação Ortogonal por Divisão de Frequência. **Anexo a Resolução n. 397**, 4 p. Mai 2004.

CAPÍTULO 3

MECANISMOS DE PROPAGAÇÃO

Para o correto dimensionamento de um rádio enlace é muito importante estimar o comportamento do sinal em todas as partes do percurso, prevendo as possíveis perdas. Este capítulo conceitua os modelos de propagação e apresenta a análise dos mecanismos de propagação que estão presentes nos enlaces na faixa de 2,4GHz.

3.1 INTRODUÇÃO

3.1.1 MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Conforme abordado no capítulo 2 e apresentado na Recomendação ITU-R P.530-9 – Dados de Propagação e métodos de Predição necessários para o projeto de um sistema de radiovisibilidade terrestre [1], os efeitos de propagação que se deve considerar em um projeto de um sistema de radiovisibilidade são:

- Difração devido a obstruções no percurso por obstáculos sob condições de propagação adversas;
- Atenuação devido a gases atmosféricos;
- Desvanecimento (fading) devido ao efeito multipercurso atmosférico ou espalhamento de irradiação associado com camadas anormais de refração;
- Desvanecimento devido ao efeito multipercurso resultante das reflexões das ondas de superfície;
- Atenuação devido a precipitação ou de partículas sólidas na atmosfera;
- Variação do ângulo de recepção no receptor e o ângulo de transmissão no transmissor devido a refração;
- Redução da discriminação de polarização cruzada em multipercurso ou em condições de precipitação;

- Distorção do sinal devido ao desvanecimento seletivo da frequência e atraso durante a propagação multipercurso.

Analisando os itens acima nota-se a complexidade e dificuldade encontrada em definir com precisão todas as características do meio de propagação e, assim calcular as perdas de transmissão. Por esse motivo são utilizados os modelos de propagação ou predição.

Um modelo de predição é um conjunto de expressões matemáticas, diagramas e algoritmos utilizados para representar as características de um rádio enlace, para um determinado ambiente.

Os modelos de propagação podem ser:

- Empíricos - também chamados de estatísticos;
- Teóricos;
- Híbridos.

Na sequência, serão brevemente apresentadas as características destes modelos.

3.2 MODELOS EMPÍRICOS DE PROPAGAÇÃO

Os modelos empíricos são baseados em observações e medições e são utilizados para a predição do cálculo de perda no espaço livre, embora existam propostas de modelos de propagação para o cálculo de atenuação por chuva e para o efeito do caminho por multipercurso. Um ponto forte para o modelo empírico está em considerar que toda a influência do meio envolvido é reconhecida separadamente. Por outro lado, a precisão do mesmo depende não apenas da precisão dos instrumentos de medidas utilizados, mas também da similaridade entre os meios a serem analisados e o ambiente no qual foi feito o estudo do modelo. A eficiência computacional destes modelos é geralmente satisfatória.

Os modelos empíricos se subdividem em duas categorias, chamadas de dispersivas no tempo e não dispersivas no tempo [2], assim designado, para oferecer informações relacionadas às características da dispersividade no tempo de um canal, ou seja, o atraso do caminho multipercurso espalhado no canal.

3.3 MODELOS TEÓRICOS DE PROPAGAÇÃO

Os modelos teóricos são baseados nos princípios fundamentais da física, especificamente nos fenômenos da propagação das ondas eletromagnéticas para a determinação da intensidade de sinal recebido em uma particular localização e, devido a isso, podem ser aplicados em diferentes meios sem afetar a precisão. Na prática, a implementação requer um banco de dados muito grande das características do meio, de tal forma que muitas vezes se torna impraticável de se obter. Os algoritmos utilizados nestes modelos são complexos e carecem de eficiência computacional. Por esta razão, a utilização para estes modelos é restrita a pequenas áreas e em ambientes internos, mas se aplicados corretamente apresentam grande precisão comparados aos modelos empíricos [3].

Os modelos teóricos são subdivididos em modelos determinísticos e estocásticos. Os modelos determinísticos normalmente necessitam de um completo sistema de mapas em três dimensões – 3D para o ambiente à ser analisado. Um exemplo deste, é o modelo de *Ray-tracing*.

Os modelos teóricos do tipo Estocásticos modelam o ambiente como uma série de variáveis randômicas. Estes modelos são menos precisos, requerem algumas informações sobre o meio utilizado e necessitam de pouca capacidade de processamento para gerar previsões.

3.4 MODELOS HÍBRIDOS DE PROPAGAÇÃO

Com as novas tecnologias que surgem em termos de transmissão de ondas eletromagnéticas, tais como as novas formas de modulação em frequências cada vez maiores, novos desafios surgem e modelos de propagação são aperfeiçoados e ferramentas de simulação são exigidas, a fim de se adquirir previsões mais confiáveis, precisas e computacionalmente eficientes.

Atualmente tem-se questionado muito os resultados baseados nos cálculos dos modelos determinísticos, pois não expressam os parâmetros que devem ser utilizados

nos sistemas sem fio; parâmetros tais como o atraso do espalhamento de um sinal modulado no sistema *Spread Spectrum*, cobertura, direção de chegada da onda e a taxa de erro de bit (BER), necessários para a simulação de um sistema e que precisam ser incorporados como parte de um desenvolvimento de um modelo de simulação.

Os modelos estatísticos oferecem parâmetros adequados para sistemas de simulação, mas carecem de detalhamento e precisão. Por outro lado, modelos determinísticos apresentam precisão e informações sobre a cobertura específica de uma determinada área e do atraso de espalhamento, mas também são computacionalmente ineficientes, consumindo muito tempo; os modelos empíricos só fornecem informações sobre a frequência e a cobertura específica.

Para reduzir tais problemas, utilizam-se modelos híbridos de forma a aperfeiçoar a precisão, considerando a maioria dos parâmetros necessários para o estudo, reduzindo o tempo de processamento necessário. Com o avanço dos métodos de processamento digital de sinais e o desenvolvimento de algoritmos computacionais, os modelos de propagação híbridos provêm a lacuna crítica que existe hoje, a fim de oferecer melhor precisão para a mobilidade e variação dinâmica nas características dos canais de propagação. Como exemplo destas novas tecnologias, pode-se destacar os estudos com a utilização do FDTD – Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo em 2D e 3D [4], as Redes Neurais Artificiais [5] [6] ou a Teoria da Uniformidade da Difração – UTD e a Teoria das Múltiplas Imagens [7].

A seguir será analisado um modelo para a análise do presente estudo na faixa de frequência de 2,4GHz.

3.5 MODELO DE PROPAGAÇÃO *STANFORD UNIVERSITY INTERIM* (SUI)

O grupo de trabalho do IEEE que atua no protocolo 802.16 desenvolve padrões técnicos para os sistemas de acesso sem fio (FWA) [8]. Os padrões propostos para as frequências abaixo de 11GHz contêm o modelo desenvolvido pela Universidade de Stanford nos EUA, nomeado de modelo SUI. Eles são definidos para

a análise na banda de frequência do Sistema de Distribuição de Microondas Multiponto – MMDS, que abrange a faixa de 2,5 a 2,7GHz.

O modelo SUI é dividido em 3 tipos de ambiente chamados de A, B e C. O tipo A é associado à máxima perda de percurso e é apropriada para regiões acidentadas com densidade de moderada a intensa de vegetação. O tipo C é enquadrado como uma região de perda de percurso mínima, onde o terreno é plano com uma densidade de vegetação leve. O tipo B é caracterizado pela composição do tipo A e C, ou seja, predominância de terreno plano com moderada a intensa densidade de vegetação ou região acidentada com densidade de vegetação leve. A equação básica da perda do percurso com os fatores de correção é então [15],

$$PL = A + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_h + s \quad (3.1)$$

onde d é a distância entre a antena transmissora e a antena receptora em metros, d_0 é a distância mínima entre as antenas e vale 100 m e s é o fator de distribuição estatística do tipo lognormal que é utilizado para calcular o desvanecimento devido a árvores e outros obstáculos e vale entre 8,2 a 10,6dB. Os valores dos outros parâmetros são definidos como:

$$A = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (3.2)$$

$$\gamma = a - bh_b + ch_b \quad (3.3)$$

onde o parâmetro h_b é a altura do transmissor em metros e deve estar entre 10 e 80 m. As constantes utilizadas como a , b e c são apresentadas na TABELA 5. O parâmetro γ que aparece na equação (4.29) é igual para o expoente da perda de percurso. Para um dado tipo de terreno o expoente da perda de percurso é determinado por h_b .

TABELA 5 – Valores numéricos para os parâmetros do Modelo SUI

Parâmetro do modelo	Terreno tipo A	Terreno tipo B	Terreno Tipo C
a	4,6	4,0	3,6
b (m ⁻¹)	0,0075	0,0065	0,005
c (m)	12,6	17,1	20

O fator de correção para a frequência de operação e para a altura da antena do receptor para o modelo é:

$$X_f = 6,0 \log_{10} \left(\frac{f}{2000} \right) \quad (3.4)$$

$$X_h = -10,8 \log_{10} \left(\frac{h_r}{2000} \right) \text{ para terrenos do Tipo A e B} \quad (3.5)$$

$$= -20,0 \log_{10} \left(\frac{h_r}{2000} \right) \text{ para terrenos do Tipo C} \quad (3.6)$$

onde f é a frequência em MHz e h_r é a altura da antena do receptor em metros. O modelo SUI é utilizado para efetuar a predição da perda de percurso em três tipos de ambientes, denominados de áreas rural, suburbana e urbana.

3.6 ANÁLISE DOS MECANISMOS DE PROPAGAÇÃO PARA FAIXA DE 2,4GHz

Um bom planejamento de um rádio enlace pressupõe que os lances sejam calculados com a maior precisão possível, de forma a estimar a amplitude e a frequência dos desvanecimentos, bem como as potências de ruídos resultantes.

Os cálculos têm sempre como ponto de partida os perfis dos terrenos dos lances previstos e as alturas das antenas são escolhidas de maneira tal que as reflexões sejam mínimas e que o feixe do enlace não seja obstruído pelo terreno. Deve-se ainda

considerar os constantes desvanecimentos por razões meteorológicas, a serem evitados sempre que possível.

Analisando os parâmetros dos efeitos de propagação definidos pela ITU-T e apresentados nos capítulos anteriores, as influências atmosféricas em UHF são devido aos efeitos que serão à seguir explorados, complementando apenas as informações já fornecidas no item 2.8 deste trabalho, específicas a faixa de frequência em estudo.

3.6.1 A FAIXA DE UHF

A frequência de 2,4GHz está contida na faixa denominada de UHF – *Ultra High Frequency* que, conforme a Tabela 1 específica que essa faixa vai de 300MHz a 3GHz. Cabe aqui um esclarecimento referente ao termo microondas, pois alguns autores definem a faixa de microondas como a parte do espectro eletromagnético que fica entre o limite convencional de rádio frequência e as frequências da irradiação de infravermelho. Outros admitem que a faixa de microondas estende-se entre 1GHz (comprimento de onda de 30cm) e 300GHz (comprimento de onda de 1mm). Existem ainda os que fixam a faixa como sendo a limitada pelos comprimentos de onda entre 100cm (0,3GHz) e 1mm (300GHz). Como definição mais adequada, considera-se a faixa de microondas aquela na qual os comprimentos de onda envolvidos são da mesma ordem de grandeza das dimensões físicas dos componentes utilizados ou menores. Este conceito é correto se levado em conta que sempre que as dimensões dos elementos se aproximarem do comprimento de onda ou tornarem-se maiores, as técnicas de análise, construção, ajuste e medição serão semelhantes quer sejam em frequências extremamente elevadas ou em comprimentos de ondas de dezenas de centímetros.

3.6.2 REFRAÇÃO ATMOSFÉRICA

A refração da atmosfera terrestre altera a trajetória das ondas de rádio que podem ser mudadas de acordo com a hora do dia, a época do ano e as condições atmosféricas. Aqui se destaca o fator K – que é a peça chave para a correção do perfil

terrestre, definido como a relação entre os raios virtual (aumentado) e real (de aproximadamente 6370km) da terra, devido ao comportamento refrativo da atmosfera, que faz com que os feixes de rádio sejam normalmente encurvados para baixo. Um valor muito utilizado para K e denominado de K médio, que depende dos fatores sazonais de temperatura absoluta, umidade e pressão do ar é de $4/3$, o que significa dizer que um raio equivalente médio valeria 8490km para uma dada região. Além disso, deve-se considerar uma análise estatística do tempo médio para o valor de K , ou seja, além do K médio, torna-se necessário determinar as piores condições de K , para considerar o feixe nas piores situações. Para tal, utiliza-se o modelo estatístico Gaussiano de distribuição.

Para o projeto de rádio enlaces, deve-se sempre corrigir o perfil da terra, aplicando dois fatores K , sendo um para atmosfera padrão $K=4/3$ ($K_{\text{médio}}$) e outro que se chama $K_{\text{mínimo}}$ cujo valor é dado pela recomendação 530-09 do ITU-R[9], no qual o valor de K varia em função do comprimento do enlace considerado para 99,9% do tempo no pior mês do ano (mês em que as variações climáticas são maiores).

Para enlaces longos, o fator K determinante será sempre o $K_{\text{mínimo}}$, pois ao percorrer um espaço maior, as ondas passam por vários meios distintos em que os índices de refração são variados e neste caso a aplicação do $K_{\text{mínimo}}$ aproxima-se mais da realidade, ao contrário do $K_{\text{médio}}$.

A FIGURA 16 apresenta o valor de K excedido para 99,9% do tempo no pior mês do ano para um local onde predomina o clima continental temperado, havendo algumas diferenças para o clima brasileiro.

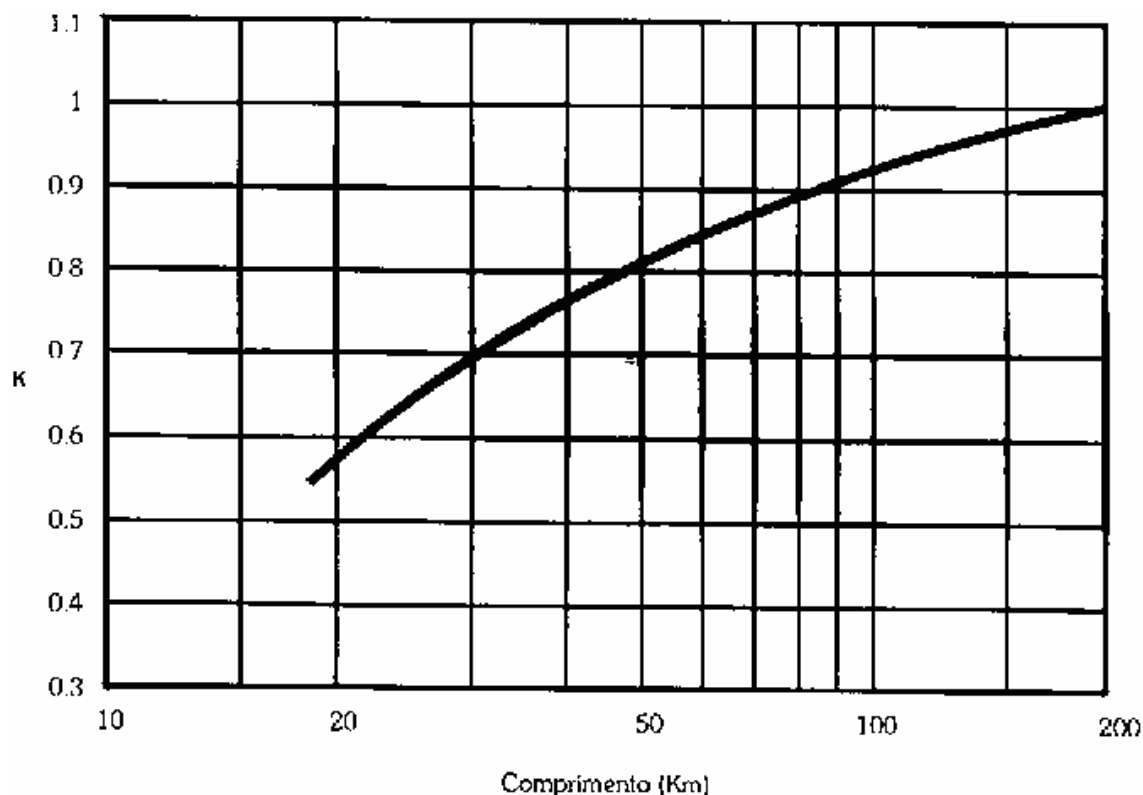


FIGURA 16- Valor de K excedido para 99,9 % do tempo no pior Mês do Ano (Clima Continental Temperado)

Os valores de $K_{\text{mínimo}}$ são menores do que 1 e com isso ao se aplicar este valor na correção da Terra, tem-se um estufamento da Terra maior (raio diminuído) em enlaces longos. Para enlaces curtos o K determinante é o $K_{\text{médio}}$ $K=4/3$.

3.6.3 REFLEXÃO

A reflexão de uma onda eletromagnética pode ser devido à superfície do solo, de obstáculos que podem estar próximos ou distantes do caminho do enlace, ou ainda das camadas atmosféricas, que ocasionam oscilação do campo elétrico em torno do valor do espaço livre de acordo com a geometria do enlace. O nível de interferência (construtiva ou destrutiva) observado na antena receptora é função da atenuação da energia refletida e da defasagem entre os sinais em vista de distintos caminhos percorridos.

A reflexão pode ser do tipo difusa ou irregular, quando há um espalhamento da onda refletida em várias direções, conforme mostra a FIGURA 17, ou do tipo regular, quando o feixe se reflete de acordo com um ângulo bem definido igual ao de incidência sobre a água ($\theta_i = \theta_r$), conforme mostra a 18.

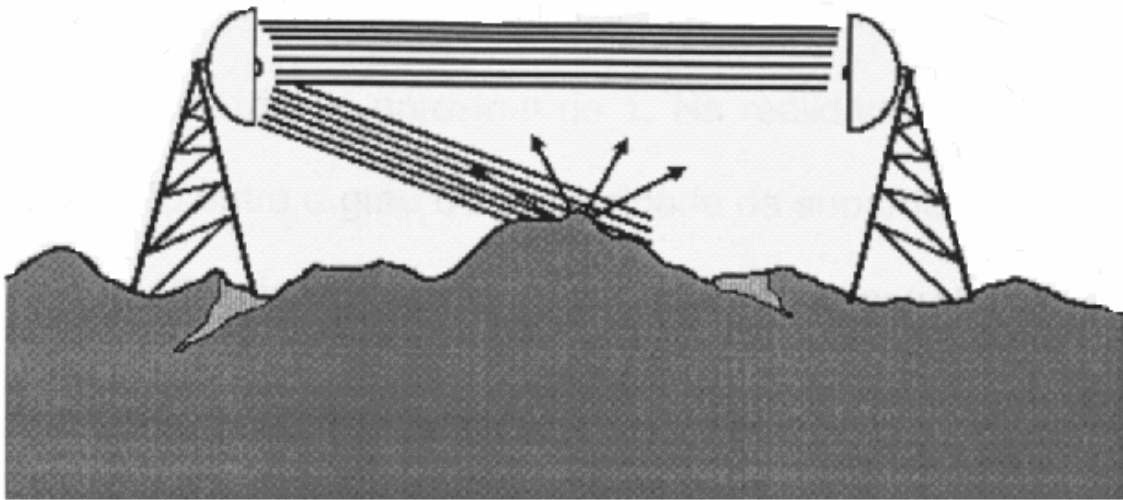


FIGURA 17- Reflexão do tipo difusa

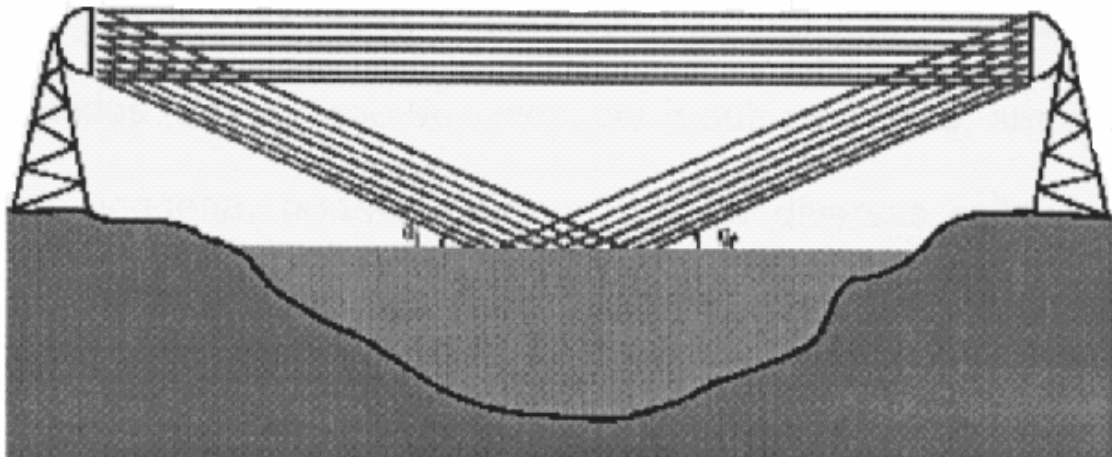


FIGURA 18 – Reflexão do tipo Regular

Se essas reflexões ocorrerem em regiões muito planas, o sinal refletido possui um nível comparável com o sinal direto, de forma que pode causar uma atenuação muito grande no sinal resultante na recepção, dependendo da diferença de fase entre os dois sinais. Portanto, o estudo da reflexão nos sistemas de rádio enlace é de extrema importância, pois qualquer sinal refletido, por menor que seja chegando a antena receptora, pode vir a prejudicar o desempenho do sistema.

3.6.4 DIFRAÇÃO

As obstruções causadas por montanhas, edifícios e árvores acarretam em uma atenuação de difração que deve ser avaliada em um enlace. Esta atenuação da difração pode alterar a liberação da 1ª Zona de Fresnel. Quanto menor a frequência e, portanto maior o comprimento de onda, mais evidente é o contorno do obstáculo, sendo independente da forma do mesmo e dependente apenas do raio de curvatura do cume. A própria terra é considerada um obstáculo a ser contornado devido à sua curvatura, conforme se vê na FIGURA 19.

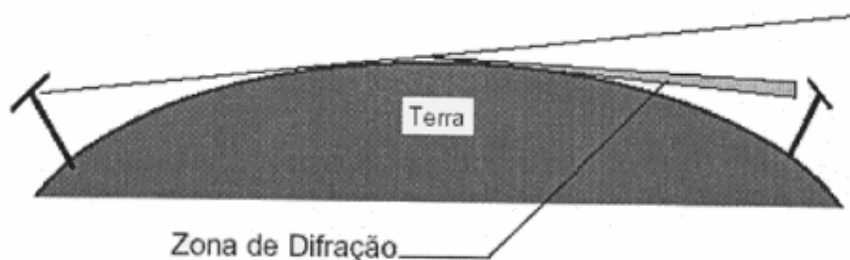


FIGURA 19 – Difração da Terra

Deve-se salientar que o cálculo da perda por difração em sistemas de propagação de rádio sobre terrenos irregulares é complexo e é feito através de modelos que dependem da forma com que a obstrução é constituída, tais como para superfícies esféricas planas e rugosas, cumes largos ou estreitos, também chamado de Gume de Faca. Para todos estes modelos, a perda por difração é sempre em função do valor de K , ou seja, quanto menor o K , maior a perda por difração, devido a influência da

curvatura da terra. O valor da perda que é utilizado normalmente corresponde ao valor do K mínimo por razões de segurança [9].

O modelo de difração para uma superfície esférica plana apresenta subsídios para o estudo onde à linha de visada entre os dois pontos de conexão se encontra a grandes distâncias, onde a própria curvatura esférica da terra é uma obstrução; este é o pior caso em termos de perda por difração.

3.6.5 ATENUAÇÃO DEVIDO A CHUVAS

Chuvas intensas constituem uma das principais causas da interrupção de sistemas de rádio enlaces, cabendo ao planejamento destes de forma a otimizar os parâmetros do projeto para alcançar a disponibilidade mínima recomendada pelas normas.

A chuva geralmente não é homogênea em toda a extensão do enlace. Se existirem regiões localizadas de altas taxas pluviométricas, as mesmas são denominadas células de chuva.

Existem vários modelos propostos para o formato das células de chuva e de distribuição da taxa pluviométrica em todas as regiões do globo terrestre, mostrando o tamanho, o formato e a distribuição da orientação das gotas de chuva. Os mesmos não serão analisados aqui, logo restringir-se-á apenas à apresentação da TABELA 5, que apresenta os parâmetros de chuva segundo a Recomendação ITU R 838 [10].

Para o cálculo da atenuação específica de um lance genérico, que é a atenuação por quilômetro do lance provocada por chuva. Essa atenuação é dependente da frequência, da polarização e da taxa pluviométrica, conforme as fórmulas:

$$\text{Para polarização vertical - } \gamma_r = K_v \cdot R^{\alpha_v}; \quad (3.7)$$

$$\text{Para polarização horizontal - } \gamma_r = K_h \cdot R^{\alpha_h}; \quad (3.8)$$

onde:

γ_r - atenuação específica (dB/km);

R – taxa pluviométrica para 0,01% do tempo (mm/h);

K_v , K_h – coeficientes dependentes da estrutura geométrica da chuva;

α_h , α_v – coeficientes dependentes da estrutura geométrica da chuva.

Da TABELA 6 observa-se que, para a faixa de frequência em estudo de 2,4GHz, os valores dos parâmetros são muito baixos e começam a ser significativos apenas acima de 8GHz.

TABELA 6 – Parâmetros da chuva segundo a Recomendação ITU R 837

Frequência (GHz)	K_b	K_v	α_h	α_v
1	0,0000387	0,0000352	0,12	0,880
2	0,000154	0,000138	0,963	0,923
4	0,000650	0,000591	1,121	1,075
6	0,00175	0,00155	1,308	1,265
7	0,00301	0,00265	1,332	1,312
8	0,00454	0,00395	1,327	1,310
10	0,0101	0,00887	1,276	1,264

3.6.6 ATENUAÇÃO DEVIDO A ATMOSFERA

A atenuação de ondas eletromagnéticas devido a atmosfera acontece pelo fenômeno da absorção, que é provocado pela transição de um nível de energia para outro no interior de uma molécula de gás atmosférico. Em uma atmosfera não condensada, o oxigênio e o vapor d'água são os principais responsáveis pela absorção de energia. A interação do oxigênio com a radiação incidente dá origem a linha de absorção em 118,74GHz e em torno de 50 a 70GHz. Já o vapor d'água que tem características moleculares diferentes apresenta três importantes linhas de absorção nas frequências de 22,00GHz; 183,30GHz; 3,00GHz e 323,80GHz.

A recomendação ITU-R P.676-4 (*Attenuation by Atmospheric Gases*) [11] apresenta dois modelos para cálculo de atenuação por gases atmosféricos. O primeiro

modelo é para o cálculo de frequências de até 1000GHz e o segundo para o cálculo de atenuação por gases de forma simplificada para a faixa de frequência de 1 a 350GHz.

Resumidamente, a atenuação atmosférica por gases depende da frequência, caracterizando a atenuação devido a absorção atmosférica em algumas faixas de frequências específicas.

3.6.7 DESVANECIMENTO OU *FADING*

Conforme já definido no item 1.8 deste trabalho, o desvanecimento pode ser do tipo plano (ou não seletivo) ou seletivo, onde o plano ocorre devido a efeitos de propagação como a estratificação da atmosfera (cintilação) e é menos severo que o desvanecimento seletivo, embora estes possam ser corrigidos pela aplicação de algum tipo de diversidade.

A ocorrência do desvanecimento seletivo se dá naturalmente devido a existência de um sinal interferente ou o chamado eco. O receptor não distingue entre o sinal desejado e o indesejado e, então, acontece a adição dos sinais, que podem apresentar relações aleatórias de fase e amplitude. A somatória tem uma larga faixa de valores que variam com o tempo, principalmente as causadas por refrações atmosféricas. Este desvanecimento seletivo que é a condição mais severa em enlaces de rádio é conhecido por multipercurso e é caracterizado por desvanecimentos rápidos e lentos. Outros tipos de desvanecimentos são ocasionados por multipercurso em atmosfera estável e turbulenta, reflexão pela camada troposférica ou em superfícies, por refração anormal, por black-out e por obstrução.

O modelo matemático de dois raios é o mais utilizado para o estudo do desvanecimento seletivo, embora o importante aqui seja calcular a probabilidade de ocorrências de desvanecimentos – plano e seletivo, para o pior mês do ano, de acordo com as recomendações do ITU – T. O modelo matemático e empírico pode estimar estas probabilidades e é aplicável a enlaces sem anomalias na propagação, tais como reflexões permanentes com níveis altos.

Como estes parâmetros são levantados considerando o pior mês, podem-se utilizar os valores diretamente no cálculo do desempenho através das recomendações do ITU-T.

3.7 CÁLCULO DO ENLACE DE UM SISTEMA DE RÁDIO DIGITAL NA FAIXA DE 2,4GHz

3.7.1 CRITÉRIOS DE RÁDIO VISIBILIDADE

Para a definição dos critérios de rádio visibilidade é necessário saber o perfil do enlace, obtido a partir ou de cartas topográficas – digitalizada para o caso de utilização de programas computacionais, ou de levantamentos em campo. Com isto, deve-se aplicar a correção equivalente da curvatura da Terra – fator K ao perfil do enlace. A escolha do valor de K é um assunto polêmico, pois muitos projetistas adotam até hoje os critérios de $K=2/3$ e $K=4/3$ para o $K_{\text{mínimo}}$ e o $K_{\text{médio}}$ indiferente de qualquer situação. Este padrão não está incorreto, mas data dos rádios analógicos e se baseia nas famosas práticas TELEBRAS. A utilização destes padrões, superdimensiona a altura das antenas, comprometendo os valores financeiros na famosa regra do custo-benefício, haja vista que o $K_{\text{mínimo}}$ determina essa altura. A recomendação ITU-R 530-09, aplica a determinação do $K_{\text{mínimo}}$ para 99,9% do tempo no pior mês do ano em função da distância, otimizando assim o sistema.

Após a correção do perfil através da aplicação do fator K , determina-se a altura da antena baseando-se na percentagem do raio de Fresnel que terá que liberar, que varia de acordo com a frequência de operação do radio enlace, que no caso deste trabalho é 2,4GHz.

Resumidamente tem-se que:

Passo 1 – Aplicação ao perfil da correção equivalente da curvatura da Terra para o valor de $K_{\text{médio}}$ para 50 % do tempo. Não havendo possibilidade de obtenção deste valor, adota-se $K=4/3$;

Passo 2 – Aplicação ao perfil da correção do valor de $K_{\text{mínimo}}$ – 99,9 % da TABELA 7, utilizando o comprimento do enlace em questão. Este gráfico faz parte da

recomendação ITU-R 530-09 em que o fator de *Kmínimo* é dado em função do comprimento do enlace em km para o pior mês do ano;

Passo 3 – Determinação da altura da antena para os valores de *Kmédio* e *Kmínimo* obtidos no passo 1 e 2 e a percentagem do raio de Fresnel, conforme a TABELA 6;

Passo 4 – Utilização do maior valor obtido entre os passos 1 e 3 para as antenas dos dois pontos do enlace.

TABELA 7 – Liberação do raio de Fresnel em função da frequência

< 1GHz	Entre 1 e 3GHz	Acima de 3GHz
30% do raio de Fresnel para K= <i>Kmédio</i>	60% do raio de Fresnel para K= <i>Kmédio</i>	100% do raio de Fresnel para K= <i>Kmédio</i>
10% do raio de Fresnel para K= <i>Kmínimo</i>	30% do raio de Fresnel para K= <i>Kmínimo</i>	60% do raio de Fresnel para K= <i>Kmínimo</i>

3.7.2 CÁLCULO DAS ALTURAS DAS ANTENAS

Do exposto no item anterior, para o cálculo das alturas das antenas utiliza-se o modelo recomendado pela ITU-R 530-09, pois este é largamente empregado na prática por considerar em seus parâmetros, valores que levam em conta as condições encontradas no campo e porque a ferramenta que fará a simulação do estudo de caso neste trabalho também está baseada nele. A fórmula para o cálculo da altura da antena, tomando-se como premissa uma altura de referência que se deve adotar na estação A, e com isso determinando a altura da estação B é dada por:

$$h_2 = \frac{d \cdot (h_{pc} + HC + MC + MS - h_B) - d_2 \cdot (h_A + h_1 - h_B)}{d_1} \quad [\text{m}] \text{ para } K = 4/3 \quad (3.9)$$

$$h_2 = \frac{d \cdot (h_{pc} + HC + MC + MS - h_B) - d_2 \cdot (h_A + h_1 - h_B)}{d_1} \text{ [m] para } Kmín \quad (3.10)$$

onde:

d – distância total do enlace [km];

d_1 – distância do obstáculo à estação A [km]. Observar que o ponto a ser adotado como obstáculo nem sempre é o ponto mais alto do perfil medido em campo como o crítico, uma vez que, ao fazer a correção da curvatura da Terra, o ponto do meio do enlace irá ser ampliado e, como este não é um método visual, não se saberá qual o ponto crítico. Verificar a necessidade de se testar alguns pontos entre o meio do enlace e os pontos mais altos e averiguar qual o pior caso e adotar este ponto.

d_2 – distância do obstáculo a estação B [km] – que é a diferença entre a distância do obstáculo a estação A e a distância total do enlace;

h_1 – altura da antena A tomada como referência [m];

h_A – altitude da estação A em relação ao nível médio do mar [m];

h_B – altitude da estação B em relação ao nível médio do mar [m];

h_{pc} – altitude do obstáculo/ponto crítico em relação ao nível médio do mar [m];

h_A – altura da antena A tomada como referência [m];

MC – margem de crescimento de árvores no ponto crítico [m]. Algumas espécies de árvores, como o eucalipto, chegam a crescer de 1,5 a 3 metros por ano. Assim, deve-se analisar se existe ou não necessidade de prever algum crescimento;

MS – margem de segurança devido à precisão das medidas [m]; principalmente em enlaces longos e matas fechadas, as medidas de campo podem não apresentar precisões devido a dificuldades de acesso aos pontos. Essa margem de segurança do projeto deve ser cuidadosamente avaliada, pois se for acrescentado 5 metros como tal, dependendo da localização do ponto crítico, esse valor pode elevar muito a altura das torres; o que leva a verificar a importância da procedência das medidas feitas em campo – *survey*.

HC – correção equivalente da curvatura da Terra para $K = 4/3 + 100\%$ do raio de Fresnel no ponto crítico [m], que é dado por:

$$HC = H_m + RF \quad (3.11)$$

sendo:

$$H_m = \frac{d_1 \cdot d_2}{(K \cdot 12.740)} \quad [\text{m}] \quad (3.12)$$

Para um K escolhido como 4/3, 2/3 ou outro extraído da FIGURA 16 e o valor 12.740 definido como o diâmetro médio da Terra em km.

RF – 100% do raio de Fresnel no ponto crítico, cujo cálculo em qualquer ponto do enlace vale:

$$RF = \left[\frac{\lambda d_x d_y}{d} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [\text{m}] \quad (3.13)$$

onde d_x e d_y são respectivamente as distâncias do ponto a ser calculado em relação as estações A e B em metros.

HC' – correção equivalente da curvatura da Terra para $K_{\text{mínimo}} + 60\%$ do raio de Fresnel no ponto crítico, que é dado por:

$$HC' = H_{m'} + RF' \quad [\text{m}] \quad (3.14)$$

onde:

$H_{m'}$ é calculado de forma idêntica a H_m , apenas aplicando o fator K adequado respectivo.

Como observação final, após o cálculo das alturas h_2 e h_2' , adota-se para o projeto sempre o maior valor obtido entre eles.

3.7.3 CÁLCULO DA ATENUAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE (A_E)

O cálculo da perda do sinal transmitido no espaço livre, que independe da antena utilizada, é dado pela expressão:

$$A_e = 92,4 + 20\log(d \cdot f) \quad [\text{dB}] \quad (3.15)$$

onde:

d – distância entre as antenas em km;

f – frequência de operação em GHz.

Para o caso da faixa de frequência em estudo – 2,4 a 2,483GHz em que o primeiro raio de Fresnel esteja livre de obstruções, tem-se a FIGURA 20, apresentando a atenuação em função da distância. Nele nota-se que, quando se dobra ou se reduz pela metade a distância, respectivamente se adiciona ou subtrai 6 dB ao valor inicial.

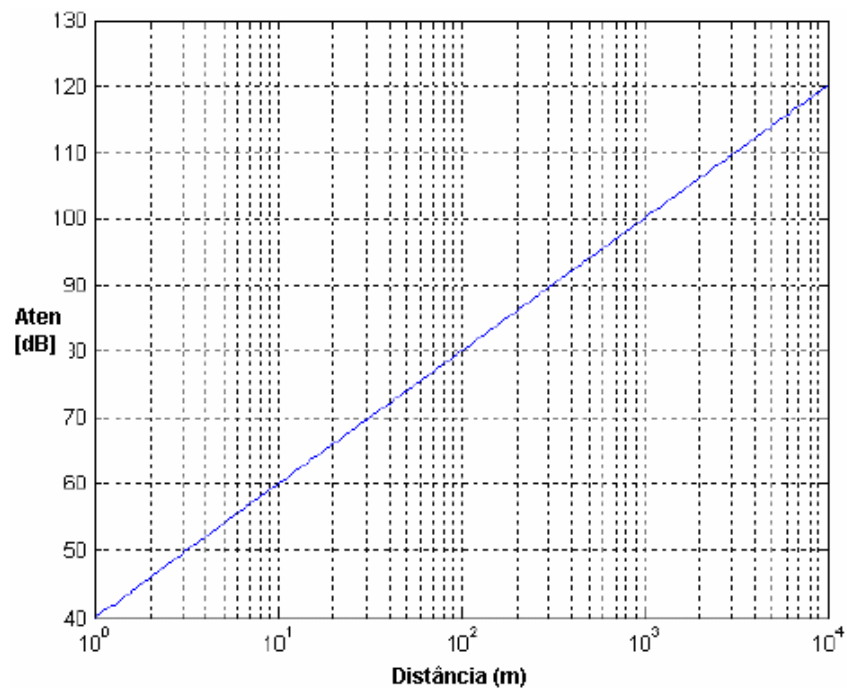


FIGURA 20- Atenuação no espaço livre para a frequência de 2,4GHz.

3.7.4 CÁLCULO DA ATENUAÇÃO TOTAL LIQUÍDA (A_T)

A atenuação total líquida para um enlace é dada por:

$$A_T = A_e + A_{ab} + A_{rmf} + A_{ca} + A_{cb} + A_{tTx} + A_{tRx} + A_{tob} - (G_T + G_R) \quad [\text{dB}] \quad (3.16)$$

onde:

A_e – atenuação no espaço livre (dB);

A_{ab} – atenuação devido a absorção na atmosfera (dB);

A_{rmf} – atenuação total no circuito de ramificação nos lados Tx e Rx (dB);

A_{ca} – atenuação no guia de onda/cabo de RF da estação A (dB);

A_{cb} – atenuação no guia de onda/cabo de RF da estação B (dB);

A_{tTx} – valor da atenuação no lado do Transmissor⁹ (dB);

A_{tRx} – valor da atenuação no lado do Receptor¹⁰ (dB);

A_{tob} – valor da perda por obstrução¹¹ (dB);

$G_T + G_R$ – ganhos das antenas de transmissão e recepção (dB).

3.7.5 CÁLCULO DO NÍVEL DE RECEPÇÃO NOMINAL (P_m)

A fórmula para o cálculo do nível de recepção nominal sem desvanecimento - P_m é importante para o cálculo da margem de desvanecimento do sistema e é dada por:

$$P_m = P_t - A_T \quad (\text{dBm}) \quad (3.17)$$

onde:

P_t – potência de transmissão em dBm;

A_T - atenuação total em dB.

⁹ Em certos casos em que são utilizados atenuadores de RF no lado do Transmissor, a fim de reduzir interferências causadas em outros enlaces.

¹⁰ - Em certos casos em que são utilizados atenuadores de RF no lado do Receptor (ou em certos casos no lado do transmissor), utilizados em enlaces muito curtos para evitar a saturação do receptor.

¹¹ Perda existente em enlaces sem visada total.

3.8 ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE E DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA RÁDIO DIGITAL NA FAIXA DE 2,4GHz

Para se garantir que um enlace esteja dentro do conceito de otimizado, conforme detalhado no item 1.3, devem-se analisar cuidadosamente determinados parâmetros a fim de evitar a utilização de margens excessivas nos mesmos, que além de encarecê-los, não traz resultados práticos melhores; e na situação oposta para margens estreitas, o risco é do enlace não funcionar ou funcionar não em 100% do tempo. O desempenho, a disponibilidade e a confiabilidade de um sistema de rádio enlace dependem de parâmetros sistêmicos, que são classificados em:

- Parâmetros de equipamentos – tais como o MTBF¹² ou o MTTR¹³, a taxa de erro residual, perda de retorno e o tempo de autenticação;
- Parâmetros do sistema aéreo – relacionados ao sistema irradiante, ou seja, antenas, cabos, conectores;
- Parâmetros de propagação – tais como a reflexão, refração, difração, desvanecimento, entre outros.

Define-se desempenho de um enlace como a análise estatística das variáveis envolvidas no *link* durante o seu período de disponibilidade, para a verificação da qualidade do mesmo.

Disponibilidade é a situação em que o sistema esteja operando dentro das condições pré-estabelecidas em um determinado período de tempo. Portanto o sistema pode estar em dois estados: disponível e indisponível.

O sistema está indisponível em um ou ambos os sentidos quando ocorre o evento segundos severamente errados (SES) por dez ou mais segundos consecutivos. O evento SES está detalhado nas recomendações G821 [12] e G826 [13] e é definido como o limiar de operação do sistema, ou seja, o limite de qualidade entre um sinal aceitável e inaceitável. A transição entre os dois estados é caracterizada utilizando o tempo limite de 10 segundos.

¹² MTBF – Tempo Médio entre Falhas.

¹³ MTTR – Tempo Médio entre Reparos.

Portanto a disponibilidade de um sistema é dada por:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3.18)$$

E a indisponibilidade é dada por:

$$N = \frac{MTTR}{MTBF + MTTR} \quad (3.19)$$

Ou ainda, de (3.18) e (3.19) temos:

$$N = 1 - A \quad (3.20)$$

Nos sistemas de telecomunicações de uma forma geral, o MTBF é bem maior que o MTTR, que leva a considerar que:

$$N \cong \frac{MTTR}{MTBF} \quad (3.21)$$

A confiabilidade de um sistema é tanto melhor quanto maior for o tempo de operação livre de falhas em relação ao tempo total, assim como quanto menor for o tempo de paralisação do sistema devido às falhas, definido como o tempo de reparo.

Nos próximos itens serão analisados os parâmetros para a análise do desempenho e disponibilidade de enlaces ponto-a-ponto.

3.8.1 ESTUDO DAS INTERFERÊNCIAS

Os sinais interferentes são provenientes de diversas fontes e causam atenuações na margem dos enlaces e conseqüentemente degradam o desempenho e a disponibilidade destes. As interferências são classificadas em:

- Interferências do mesmo enlace causadas por outros canais de RF compartilhando o mesmo enlace. Isso ocorre em casos de *links* com redundância ou que utilizam diversidade de frequências;
- Interferências Intra-sistema, causado por outros enlaces, porém pertencentes ao sistema projetado;
- Interferências de outros sistemas – analógicos e digitais.

Todas essas interferências devem ser consideradas no cálculo do desempenho e na escolha do tipo de antena, bem como na elaboração do plano de frequências e a polarização adequada para cada enlace, que dependem fundamentalmente dos níveis de sinais interferentes.

Para tornar o estudo das interferências mais didático, dividem-se as mesmas em fixas ou variáveis.

As fixas são as que mantêm a relação S/N constante independente das condições de propagação, ou seja, quando o sinal desejado sofre atenuação, a interferência também sofre, mantendo a relação S/N constante.

Já as interferências variáveis são aquelas que dependem das condições de propagação, pois a relação S/N não é mantida constante conforme a variação do nível de recepção devido ao desvanecimento; as interferências percorrem trajetos diferentes do sinal desejado. O valor de S/N decresce quando ocorre o desvanecimento do sinal desejado. Portanto as interferências variáveis são muito mais prejudiciais que as fixas, causando uma degradação maior e podem ser classificadas de acordo com a sua fonte, a saber:

- Interferência do mesmo enlace – para o caso de equipamentos operando na configuração $n + 1$ (n canais principais e mais um canal de proteção), acontecem interferências mútuas entre os canais de RF pertencente ao mesmo enlace, que são as interferências de canais adjacentes e co-canal;
- Interferência do sinal refletido no alimentador – devido a descasamentos no sistema aéreo (tanto na transmissão como na recepção), ocasionando atraso no recebimento do sinal.

- Interferência de outros enlaces/sistemas – que pode ser intra-sistema quando são enlaces do mesmo projeto e inter-sistema quando não;

Para sistemas operando em frequências abaixo de 2GHz, podem existir ainda, dependendo da localização da estação e da torre, interferências causadas pelo chamado ruído ambiental, tal como o ruído devido a ignição de veículos. Enlaces de UHF com antenas baixas e localizadas nas proximidades de estradas ou rodovias são suscetíveis a esses ruídos.

Portanto a degradação total devido às interferências será:

$$D_T = D_f + D_v \quad (3.22)$$

onde:

D_f é degradação causada pelas interferências fixas e D_v pelas variáveis.

Para a correta análise das interferências no protocolo 802.11b onde as transmissões são todas feitas por pacotes, deve-se efetuar um estudo mais detalhado em relação aos parâmetros envolvidos.

Desta forma, a probabilidade de um quadro trafegar por elas com sucesso é inversamente proporcional ao comprimento do quadro. Matematicamente temos:

$$p = (1 - p)^n \quad (3.23)$$

sendo:

p a probabilidade da ocorrência de um erro em qualquer bit;

n quantidade de bits de um quadro qualquer

Portanto se houver quadros longos demais, estes apresentarão grande probabilidade de chegarem ao outro ponto com erros e fatalmente serão retransmitidos. Existe ainda a interferência inter-simbólica que ocorre devido à não homogeneidade do meio de transmissão, no caso a ar, onde diferentes frequências propagam-se com diferentes velocidades. Se a relação entre o deslocamento de fase resultante e a frequência for não linear, o meio causará distorção por atraso de propagação no sinal transmitido por ele. Esse fenômeno é também conhecido como espalhamento

temporal, proveniente do efeito multipropagação, que faz com que vários componentes de um sinal transmitido cheguem de diferentes direções em tempos diferentes na estação receptora. Assim, em uma comunicação de dados, essa interferência faz com que o sinal relativo ao bit anterior interfira sobre o próximo, portanto limitando a sua taxa de transmissão.

Do exposto no capítulo 2, onde foram apresentadas as características da camada de enlace do protocolo 802.11b com relação ao modo DCF, quando se utiliza o modo RTS/CTS, colisões podem existir devido à diferença entre os alcances de transmissão e interferências. O alcance de transmissão determina que a transmissão seja possível dentro de um raio em torno do transmissor. Dentro de um segundo raio denominado de alcance de detecção, a potência de transmissão é grande o suficiente para diferenciar a transmissão do ruído. Em um terceiro raio ainda maior, denominado de alcance de interferência, onde o transmissor pode interferir em outra transmissão. Um nó não pode ser capaz de se comunicar com outro, mas os nós podem colidir com um nó intermediário, pois o alcance de interferência é aproximadamente duas vezes maior que o alcance de transmissão para as redes sem fio [14].

Avalia-se também que os valores de tempo requeridos para a camada MAC na configuração PCF, são claramente definidos na norma. Efetuando alguns cálculos a partir destes em relação aos parâmetros SIFS e PIFS e respectivas confirmações ACK, conclui-se que acima de algumas centenas de metros não há possibilidade de alcance [15]. Já na configuração DCF torna-se possível, pois os intervalos de tempo dos parâmetros definidos pela norma são mais flexíveis.

Para a determinação do alcance máximo do enlace para que não haja perda na taxa de transmissão devido a colisões utilizando o DCF, considera-se o tempo a qual uma estação irá aguardar para verificar se o canal está livre, ou seja, o tempo de espera máximo do ACK, que vale 50 μ s, que é o intervalo de tempo do DIFS. Nestas condições a distancia máxima é de 7,5km, ou seja, dentro deste valor o protocolo 802.11b na configuração DCF na camada MAC irá operar de forma adequada e acima desta distancia, o *throughput* decairá a partir do seu valor máximo teórico de 11Mbps

sucessivamente para 5,5; 2 e 1Mbps, devido às colisões que irão acontecer e assim, retransmissões serão necessárias.

Alguns modelos analíticos são propostos para a análise do desempenho na camada MAC [16], diferenciando-os inclusive para as condições de tráfego saturado [17] e não-saturado [18], denotando a importância da análise minuciosa destes parâmetros para o bom funcionamento de redes sem fio. Estudos apresentam resultados numéricos do desempenho de um canal de rádio para o 802.11, citando que o rendimento deste em condições de tráfego decai em mais de 50% em relação a um canal livre de tráfego [19].

Uma outra questão para a análise do desempenho das redes sem fio é determinar a quantidade máxima de transmissões concorrentes na camada de enlace, para daí estimar a capacidade máxima destas redes. Para isso, deve-se analisar detalhadamente o protocolo MAC e se efetuar uma simulação utilizando um modelo teórico-gráfico da rede sem fio [20], que resulta em uma melhor confiabilidade e respectiva disponibilidade entre os terminais. O protocolo modificado utiliza uma pequena quantidade da informação local, para implicitamente estimar a quantidade da capacidade residual em torno de um terminal e utiliza-o para ajustar o tamanho da janela do *backoff*.

Existem realmente anomalias no mecanismo de atuação do método de acesso executado pela camada MAC, quando da análise prática do desempenho do protocolo 802.11b [21]. O problema está na conceituação básica do método de acesso CSMA/CA, que garante uma mesma probabilidade de acesso em um determinado tempo a todos os terminais. Mas quando algum terminal captura o canal por um período longo em decorrência a uma baixa taxa de transmissão de dados, outros terminais são penalizados que poderiam utilizar uma taxa maior de transmissão. Posteriormente foi proposta uma solução para tal, alterando-se a configuração do tamanho da janela de contenção inicial, que é inversamente proporcional a taxa de bits [22].

3.8.2 ANÁLISE DAS INTERFERÊNCIAS

A partir da análise da topologia do enlace existente, inicialmente deve-se realizar a seleção de todas as possíveis interferências que podem degradar a qualidade do enlace em estudo. Selecionam-se todos os enlaces próximos projetados conhecidos, com operação na mesma faixa de frequência, para verificação de interferências co-canal, e interferências de canal adjacentes, próximos ao enlace em questão. Depois se calcula a intensidade de sinal de cada fonte interferente, para verificar a contribuição de cada interferência na degradação da margem do enlace.

Aqui se destaca a dificuldade do exposto acima, devido ao não licenciamento das faixas de frequência que operam em 2,4GHz. Como alternativa, existe a possibilidade desta verificação em campo, através da utilização de um analisador de espectro que tenha a opção da detecção de sinais em espalhamento espectral, cuja aquisição, além de cara é difícil, pois exige que o comprador comprove para o fornecedor do referido equipamento, que exerça atividade fiscalizadora em órgãos governamentais ou de pesquisa em institutos renomados.

As emergentes tecnologias de sistemas sem fio que dividem a mesma faixa de frequência não licenciada de 2,4GHz e operam num mesmo ambiente, interferem frequentemente umas sobre as outras, causando sérios problemas de desempenho em enlaces ponto-a-ponto. Por isso, este item apresenta o efeito que alguns dispositivos que se utilizam desta banda causam nas redes 802.11b.

O primeiro equipamento a ser analisado é também o mais antigo a utilizar esta faixa de frequência, denominada de ISM: o forno de microondas. Ele é modelado efetivamente como um transmissor de onda quadrada de banda estreita com um ciclo de trabalho de 50%, com a duração de cada pulso de aproximadamente 16,7ms [23]. Simulações feitas com o forno nos sistemas *Spread Spectrum* [24] demonstraram que a intensidade do sinal em um rádio que opera por saltos de frequência – FH precisa exceder a interferência de um forno por cerca de 16dB em uma taxa de 1Mbps para transmissões de pacotes de comprimentos longos (acima de 200B), e para pacotes de

comprimentos curtos (entre 100 e 200B) não há risco de interferência, devido a sua facilidade em evitar os trens de pulso de interferência.

Para a sequência direta – DS, estes são menos dependentes do comprimento dos pacotes. A razão para isso é que o DS não evita o pulso interferente do forno, ele o suprime pela característica do seu receptor trabalhar com uma grande largura de banda, evitando as retransmissões, pois os fornos não são ativos durante todo o seu ciclo de aproximadamente 20ms e se encontram em uma frequência bem próxima a 2,45GHz. Experiências mostraram que os receptores DS operam muito próximos aos fornos e ainda mantém boas taxas de dados.

Outra tecnologia que pode interferir no *Wi-Fi* é a do *Bluetooth* (BT), caracterizada como uma rede pessoal sem fio – WPAN, de curto alcance (cerca de 10m), velocidade limitada (até 1Mbps) e de baixo custo para operação entre dispositivos móveis pessoais tais como agendas, fones de ouvidos, periféricos de computadores, entre outros. As duas tecnologias portanto são, antes de concorrentes, complementares e o problema de interferência se torna ainda pior, pois convivem em um mesmo ambiente, uma interferindo na outra mutuamente.

A camada física do BT utiliza a técnica de saltos em frequência – FH à taxa de 1600 saltos/s (cerca de 625 μ s de tempo de permanência em cada canal) e utiliza a modulação GFSK sobre 79 canais de 1MHz de largura de banda na faixa de frequência de 2,4GHz, com um nível de potência em torno de 1mW (0dBm). Suporta até 8 dispositivos ativos em uma mesma área – denominada picocélula.

As interferências entre *Wi-Fi* e o BT ocorrem ou quando um receptor 802.11b detecta um sinal do BT no mesmo instante em que um sinal do 802.11b é enviado para ele (principalmente quando um sinal do BT estiver dentro de um subcanal do *Wi-Fi*), ou quando o receptor do BT detecta um sinal do 802.11b no mesmo instante em que um sinal do BT é enviado para ele (principalmente quando um sinal do *Wi-Fi* estiver dentro de um subcanal do BT). Nota-se que nem o BT e nem o 802.11b foram projetados com mecanismos que evitassem a interferência que cada um causa no outro, exceto para as interferências que a tecnologia *Spread Spectrum* originalmente é imune.

Estudos feitos através de modelos de interferência [25] apresentam como resultados para distâncias em torno de 10m, degradações das taxas de transmissão sobre o *Wi-Fi* da ordem de 25 a 66% para uma taxa de utilização leve e pesada do BT, respectivamente. Alguns mecanismos de coexistência são propostos para a redução desta interferência [26], baseados em técnicas de um sistema de controle de tráfego, ou instalados nos dispositivos do 802.11b, ou instalados no BT. Outras alternativas sugeridas [27] vão desde a alteração de regras das normas internacionais para a utilização da faixa não licenciada de 2,4GHz para os Organismos internacionais de padronização (ITU-T e FCC entre outros) até a alteração de utilização da banda não licenciada para 5GHz, passando por alterações das técnicas utilizadas nas camadas física - PHY e de enlace – MAC.

3.8.3 COMPARAÇÃO DO ATENDIMENTO DE DESEMPENHO E DISPONIBILIDADE

Após a instalação e o alinhamento do rádio enlace, deve-se realizar a comprovação das especificações exigidas pelas normas, que consiste em registrar a taxa de erro (BER) durante um determinado período estipulado.

A ITU – R especifica que devem-se efetuar os testes pelo menos durante um mês para a avaliação do desempenho e um ano para a avaliação da disponibilidade, pois só assim tem-se a condição de avaliação do enlace perante todas as ocorrências climáticas possíveis na região. Mas, devido a necessidades das implantações serem urgentes e emergenciais nos dias de hoje, e que os equipamentos estão cada vez mais desenvolvidos e confiáveis, a duração dos testes variam de 2 a 72 horas, dependendo da capacidade de transmissão e da localização na rede de transmissão.

A recomendação F. 1330-1 [28] da ITU – R foi estabelecida com o objetivo de diminuir o tempo de teste para a entrada em operação de novos sistemas e também para reativar um sistema após uma manutenção corretiva. Esta norma estabelece um período de tempo para os testes menores, ajustando as especificações ao limite com certa margem. Se o sistema atender o especificado com essa margem mínima, pode entrar em operação comercial ou retornar, no caso da manutenção corretiva.

Para a realização do teste de taxa de erro – BER deve-se inicialmente verificar se o nível de recepção do enlace encontra-se no valor que foi calculado, pois se este nível estiver abaixo, já houve uma degradação no sinal além do dimensionado, diminuindo a margem operacional do enlace e uma probabilidade de taxa de erro maior.

Constatado que o nível de recepção esteja dentro do esperado, utiliza-se um analisador de redes digitais para a realização da análise dos dados enviados, comparando – os com os dados recebidos e registrando todos os parâmetros das recomendações ITU-T 821 e 826 e alguns itens adicionais, a saber:

- Número de erros;
- Taxa de erro de *bit*;
- Segundos com erro;
- Segundos severamente errados;
- Minutos degradados;
- Segundos sem sinal;
- Indisponibilidade.

Um detalhe importante é que esses testes devem ser realizados nos dois sentidos do enlace.

3.9 CONCLUSÃO

O capítulo apresentou um modelo de propagação que se adequa ao tipo de enlace proposto neste trabalho, a fim de apresentar suas características e peculiaridades. Em seguida foram tratados os mecanismos de propagação comuns ao tipo de enlace para a faixa de 2,4GHz, destacando-se a avaliação das fontes de interferências. Ao final é feita uma comparação entre o atendimento de desempenho e da disponibilidade, a fim de garantir que o radio enlace funcionará a contento.

3.10 REFERÊNCIAS

- [01] ITU – T. RECOMMENDATION ITU-R P.530-09, **Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Line-of-Sight Systems**, ITU – T tech. rep. Genebra, Suíça. 1994.
- [02] ANDERSON, Harry. **Fixed broadband wireless system design**. Jonh Wiley & C Chicago, USA. 2003. 516 p.
- [03] ATHANASIADOU, G. E; NIX, A. R; MCGEEHAN, J. P. A Microcellular Ray-Tracing Propagation Model and Evaluation of its Narrowband and Wideband Prediction. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications.**, vol. 18, n. 3, p.322-335. Mar. 2000.
- [04] LOYOLA, J. **Propagation models for urban environment**. Disponível em: <http://www.wtec.org/wireless/04_02.htm>. Acesso em 03 de maio de 2005.
- [05] NESKOVIC, A; NESKOVIC, N; PAUNOVIC,D. A Field Strength Prediction Model Based on Artificial Neural Networks. **9 ed. IEEE Med. Electro. Conf. MELECON**, Tel Aviv, Israel. Mai. 1998.
- [06] PERRAULT, O; ROSSI, J.P.; BALANDIER, T. Predicting Field Strength with a Neural Ray-Tracing Model. **Proc. IEEE GLOBECOM**, London, England. Nov. 1996.
- [07] TAN, S. Y.; TAN, H.S. A Microcellular Communications Propagation Model Based on the Uniform Theory of Diffraction and Multiple Image Theory. **IEEE Trans. Ant. and Prop.**, v.44, n 10, pp. 1317-1326. Out. 1996.
- [08] ERCEG, V.; HARI, K.S.; et al., Channel models for fixed wireless applications. tech. rep., **IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group**. Jan. 2001.
- [09] ITU–T. RECOMMENDATION ITU-R P.526-07, **Method for Propagation by Diffraction**. ITU – T tech. rep. Genebra, Suíça. 1999.
- [10] ITU – T. RECOMMENDATION ITU-R P. 838, **Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling**. ITU – T tech. rep. Genebra, Suíça. 1999.

- [11] ITU – T. RECOMMENDATION ITU-R P. 676-04, **Attenuation by atmospheric gases** . ITU – T tech. rep. Geneva, Suíça. 1999.
- [12] ITU – T. RECOMMENDATION ITU-T G. 821, **Error Performance of an International Digital Connection Operating at a Bit Rate Below the Primary Rate and Forming Part of an Integrated Services Digital Network**. ITU – T tech. rep. Geneva, Suíça. 1996.
- [13] ITU – T. RECOMMENDATION ITU-T G. 826, **Error Performance Parameters and Objectives for International. Constant Bit Rate Digital Paths at or Above the Primary Rate**. ITU – T tech. rep. Geneva, Suíça. 1999.
- [14] XU, S.; SAADAWI, T. Does the IEEE 802.11 MAC protocol work well in multihop wireless ad hoc networks?, **IEEE Communications Magazine**, vol.39, no. 6, pp. 130-137. Jun. 2001.
- [15] LEUNG, K. K.; MCNAIR, O.B.; CIMINI, L. J.; WOMTERS, J. H. Outdoor IEEE 802.11 Cellular Networks: MAC Protocol Design and Performance, **ICC 2002 - IEEE International Conference on Communications**, vol. 25, no. 1, pp. 595 – 599. Abr. 2002.
- [16] ZANELLA, A; PELLEGINI, F.de. Statistical Characterization of the Service Time in Saturated IEEE 802.11 Networks, **IEEE Communications Letters**, vol. 9, no. 3, pp. 225-227. Mar. 2005.
- [17] FOH, C.H.; TANTRA, W. Comments on IEEE 802.11 Saturation Throughput Analysis with Freezing of Backoff Counters, **IEEE Communications Letters**, vol. 9, no. 2, pp. 130-132. Fev. 2005.
- [18] DUFFY, K.; MALONE, D.; LEITH, D.J.. Modeling the 802.11 Distributed Coordination Function in Non-Saturated Conditions, **IEEE Communications Letters**, vol. 9, no. 8, pp. 715-717. Ago. 2005.
- [19] KIM, J.H.; LEE, J.K.. Throughput and Packet Analysis of IEEE 802.11 MAC Protocols for Wireless LANs, **Proceeding of MDMC '96**, Seoul, Korea. pp. 530-535, 1996.

- [20] BALAKRISHNAN, H.; BARRET, C.L.; KUMAR, V.S.; et al. The Distance-2 Matching Problem and Its Relationship to the MAC-Layer Capacity of Ad Hoc Wireless Networks, **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, vol. 22, no. 6. Ago 2004.
- [21] HEUSSE, M.; ROUSSEAU, F.; BERGER-SABBATEL, G.; DUDA, A.. Performance Anomaly of 802.11b, **Proceeding of IEEE INFOCOM**, pp. 836-843. Abr. 2003.
- [22] KIM, H., YONN, S.; KANG, I. Resolving 802.11 performance anomaly through service differentiation, **IEEE Communications Letters**, vol. 9, no. 7, pp. 655-663. Jul. 2005.
- [23] GAWTHOP, P.E.; SANDERS, F.H; SELL, J.J. Radio Spectrum Measurements of Individual Microwave Ovens, **NTIA Report 94-303-1**, vol. 1. Mar. 1994.
- [24] INTERSIL CORPORATION. Effects of Microwave Interference On IEEE 802.11WLAN. Reliability, **Submission to IEEE P802.11Wireless LANs**, pp. 1-22. Mai. 1998.
- [25] JO, J.H.; JAYANT, N. Performance Evaluation of Multiple IEEE 802.11b WLAN Stations in the Presence of Bluetooth Radio Interference, **IEEE International Conference on Communications, ICC '03**, vol.2, pp.1163-1168. Mar. 2003.
- [26] CHIASSERINI, C.F.; RAO, R.R. Coexistence Mechanisms for Interference Mitigation in the 2,4GHz ISM Band, **IEEE Transaction on Wireless Communications**, vol. 2, no. 5, pp. 964-975. Set. 2003.
- [27] LANSFORD, J.; STEJHPHENS, A.; NEVO, R. Wi-Fi (802.11b) and Bluetooth: Enabling Coexistence, **IEEE Network**, vol. 15, no. 5, pp. 20-27. Set/Out. 2001.
- [28] ITU – T. RECOMMENDATION ITU-R F. 1330-01, **Performance Limits for Bringing into Service of the Parts of International Plesiochronous Digital Hierarchy and Sincronous Digital Hierarchy Paths and Sections Implemented by Digital Radio Relay Systems**. ITU – T tech. rep. Genebra, Suíça. 1999.

CAPÍTULO 4

ESTUDO DE CASO

Neste capítulo será apresentado um estudo de caso prático de um enlace na faixa não licenciada de 2,4GHz, que utiliza o protocolo 802.11b na tecnologia Spread Spectrum para uma região urbana da cidade de Curitiba. Nesta abordagem, dar-se-á destaque ao nível sistêmico, de modo que sejam consideradas as principais partes constituintes do mesmo.

4.1 INTRODUÇÃO

A concepção de um rádio enlace engloba quais equipamentos utilizar, bem como sua configuração, e todas as atividades envolvidas na determinação dos locais para implantação dos equipamentos de rádio. O planejamento de um sistema deve evitar interferências e garantir a sua ininterrupção.

Neste capítulo, será projetado um radio enlace na faixa não licenciada de 2,4GHz utilizando a tecnologia *Spread Spectrum* padrão IEEE 802.11b, com a ferramenta de simulação de enlaces na camada física CELPLANNER, demonstrando uma metodologia para o dimensionamento do sistema. Serão descritos os procedimentos de projeto que se iniciam com a escolha da tecnologia, e prossegue com a configuração dos dados, a definição dos parâmetros de predição, o posicionamento das estações entre outros. Os resultados obtidos serão comparados com o radio enlace existente do SIMEPAR, para a ligação entre o Radar Meteorológico e o Edifício sede.

4.2 O SOFTWARE DE PREDIÇÃO CELPLANNER

De uma maneira geral, os *softwares* de predição ou *Survey* tem suas aplicações voltadas para o planejamento de sistemas de telecomunicações baseadas em rádio. Apresentam ferramentas a serem utilizadas para simulações de desempenho, contando com pacotes de mapas digitalizados das regiões de estudo para o cálculo de todos os

parâmetros importantes e relevantes para um sistema sem fio. A sua grande vantagem é a rapidez no processamento dos complexos cálculos, para a apresentação dos resultados de simulações na alteração das muitas variáveis envolvidas em um rádio enlace.

O Celplanner [1] é uma ferramenta de planejamento de sistemas sem fio composto de vários módulos, que permite projetar os mais variados sistemas móveis e respectivos radio enlaces, contemplando previsões de cobertura, interferências, tráfego entre outras, utilizando simultaneamente vários modelos de previsão e bases de dados de resoluções distintas.

O módulo Cellink permite o planejamento, o projeto e a visualização de radio enlaces ponto a ponto de acordo com as normas determinadas pela ITU-T, utilizando bases de dados de topografia, morfologia e imagens, garantindo cálculos de alta precisão e alta qualidade gráfica. Permite ainda a visualização de perfis de terreno com a visualização da Elipsóide de Fresnel, realizando cálculos de porcentagem de obstrução de visada direta, mínima área livre sobre o percurso, assim como a perda no espaço livre. O *software* considera rádio enlaces digitais, observando diversos aspectos que influenciam o desempenho do sistema, tais como taxa de transmissão, tipo de modulação, o ganho devido a algoritmos de correção de erros, entre outros. A interface é amigável e permite a alteração de parâmetros importantes ao cálculo, como o raio médio da Terra, frequência de operação, tipo e altura das antenas e parâmetros de modulação.

4.3 O ESTUDO DE CASO SIMEPAR

O tempo meteorológico é um dos fatores naturais que, pela complexidade de seus fatores formativos, tem sido arduamente estudado visando sua previsão no mais curto tempo e em maior horizonte de previsão possível. As variáveis são muitas, porém já existem modelos matemáticos computacionais que são eficientes na previsão das condições meteorológicas. O bom resultado, no entanto, está diretamente relacionado a agilidade com que são disponibilizadas as diversas variáveis que alimentam o modelo.

No cotidiano atual de uma sociedade tecnológica, cada vez mais indispensável é o acesso a diversos níveis de informação em tempo real. É dentro deste contexto que se destaca a importância dos sistemas de comunicação, que veiculam dados praticamente no instante em que são gerados.

No estado do Paraná, com a sua economia grandemente calcada na agricultura e no agro-negócio, a operacionalidade de um sistema eficiente de transmissão de informações meteorológicas é imprescindível. Esta importância vai desde as decisões sobre a programação do plantio e da colheita dos grãos, até a logística de armazenamento, transporte e embarque de grandes volumes de produtos nos navios graneleiros.

Desta forma nota-se claramente a importância do Instituto Tecnológico SIMEPAR - entidade que fornece previsões meteorológicas para o estado do Paraná, em manter a sua Central de Operações (FIGURA 21) localizada em Curitiba – na Universidade Federal do Paraná, Campus Centro Politécnico (FIGURA 22), atualizando em tempo real os seus sistemas de previsão com as informações provenientes de seu radar meteorológico tipo Doppler (FIGURA 23), baseado no município paranaense de Teixeira Soares, cidade situada na região centro-oeste do estado do Paraná, a uma distância em linha reta de aproximadamente 110km da capital. Os dados coletados por este equipamento são transmitidos por um rádio-enlace dividido em dois segmentos. O primeiro está compreendido entre o trecho do Radar (FIGURA 24) e um repetidor localizado em São Luis do Purunã, perfazendo aproximadamente 70km de distância em linha reta; o segundo trecho interliga São Luis do Purunã (FIGURA 25) ao Edifício Sede em Curitiba – em uma distância de aproximadamente 40km.



FIGURA 21- Centro de Operações do Simepar



FIGURA 22– Edifício Sede do Simepar



FIGURA 23 – Radar Meteorológico tipo Doppler localizado em Teixeira Soares



FIGURA 24 – Detalhe da antena do enlace Radar – São Luis do Purunã



FIGURA 25 – Sistema Irradiante do Repetidor em São Luis do Purunã

A central de Operações do SIMEPAR de posse dos dados coletados a partir do radar meteorológico fornece informações em tempo real da situação do tempo num raio de 480km de distância a partir do radar, cobrindo assim todo estado do Paraná e parte dos estados de Santa Catarina e São Paulo (FIGURA 26), sendo de extrema importância não só para a predição do tempo, mas também para defesa civil, justificando assim a necessidade de acompanhamento das condições meteorológicas em tempo real.

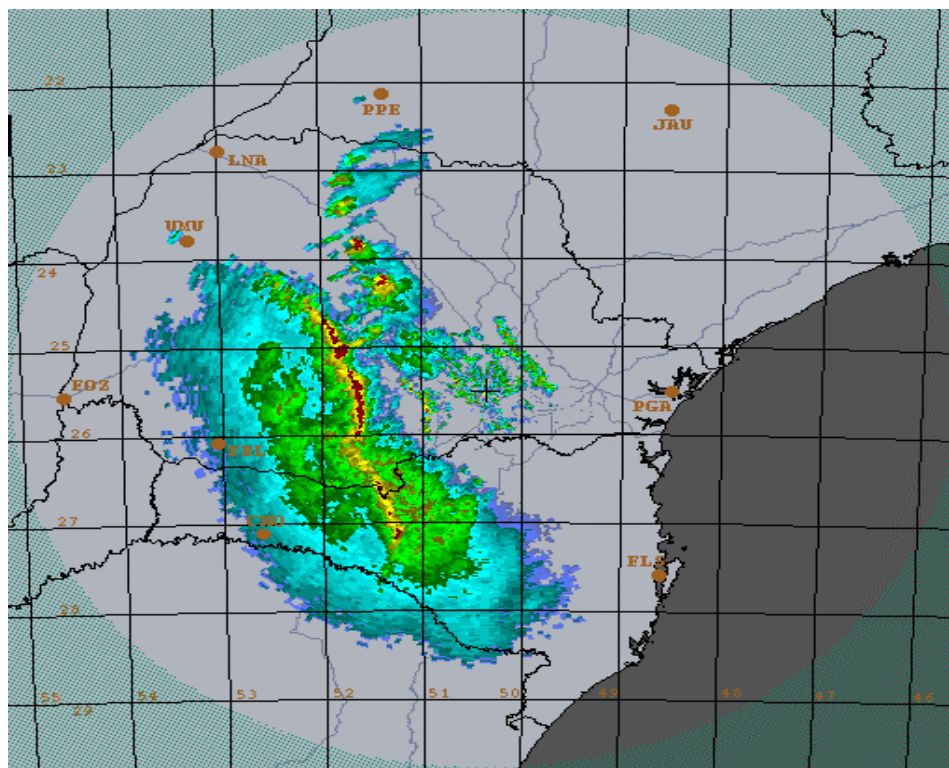


FIGURA 26 – Área de Abrangência do Radar Meteorológico do Simepar

O rádio-enlace entre o radar e o SIMEPAR foi instalado no mês de outubro do ano de 2000 e por mais de dois anos apresentou um desempenho conforme o planejado, ou seja, operando a uma taxa de dados média de 1Mbps. A partir daí, o enlace apresentou sensível degradação no trecho compreendido entre o Edifício sede e o Repetidor nos dois sentidos, conforme pode ser constatado respectivamente nas FIGURAS 27 e 28, que apresentam telas do *software* de monitoramento do roteador *Wavelink* [2], instalado dentro do bastidor do equipamento de rádio (FIGURA 33), que gerencia, configura e diagnostica enlaces utilizando o protocolo 802.11b.

As telas apresentam a parte do *software* referente ao diagnóstico do enlace no trecho Curitiba – São Luis do Purunã nos dois sentidos, a partir das estatísticas feitas ao longo do mesmo. Na parte superior da janela do *software* é mostrada a qualidade do *link*, de acordo com os valores indicados na parte central e inferior, que mostram os níveis – local e remoto dos pontos sob análise. O campo SNR (*Signal to Noise Ratio*) é o indicador básico para validar as qualidades entre as estações, e fornece a intensidade

absoluta da recepção do nível de sinal relativo à taxa do nível de ruído percebido pelas estações. Valores baixos indicam altos níveis de interferências. Os campos *Signal* e *Noise level* indicam respectivamente, o nível de sinal recebido da outra estação e o nível de interferência recebido de outros sistemas nas vizinhanças das estações. No caso da FIGURA 27, o valor de SNR na estação em Curitiba está muito baixo, no caso 3 e na estação de São Luis está razoável, valendo 19.

Na parte inferior da tela, o campo denominado *packets* apresenta a porcentagem de pacotes recebidos com relação ao número de pacotes esperados e o campo *Received* e *Lost* informam respectivamente, a quantidade e a porcentagem dos pacotes recebidos e perdidos. No detalhe destacado na FIGURA 27 vê-se que houve o recebimento de somente 10 dos 166 pacotes enviados, ou seja, 6% de aproveitamento, resultando numa qualidade do enlace definida pelo sistema como pobre.

Na FIGURA 28, diferentemente da anterior, conclui-se que o mesmo enlace, no sentido São Luis do Purunã – Curitiba apresenta qualidade boa, pois nas duas estações os pacotes foram recebidos sem erros, apesar de existirem baixos valores de SNR.

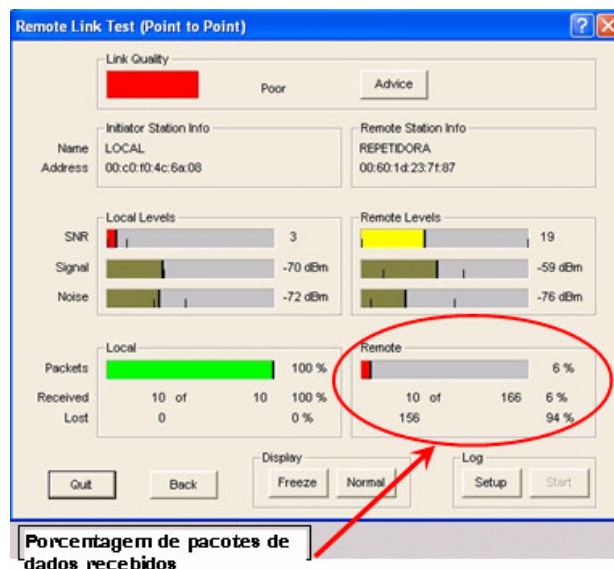


FIGURA 27 – Tela do *software* de Monitoramento do *link* entre Curitiba e São Luis do Purunã – sentido Sede-Repetidora.

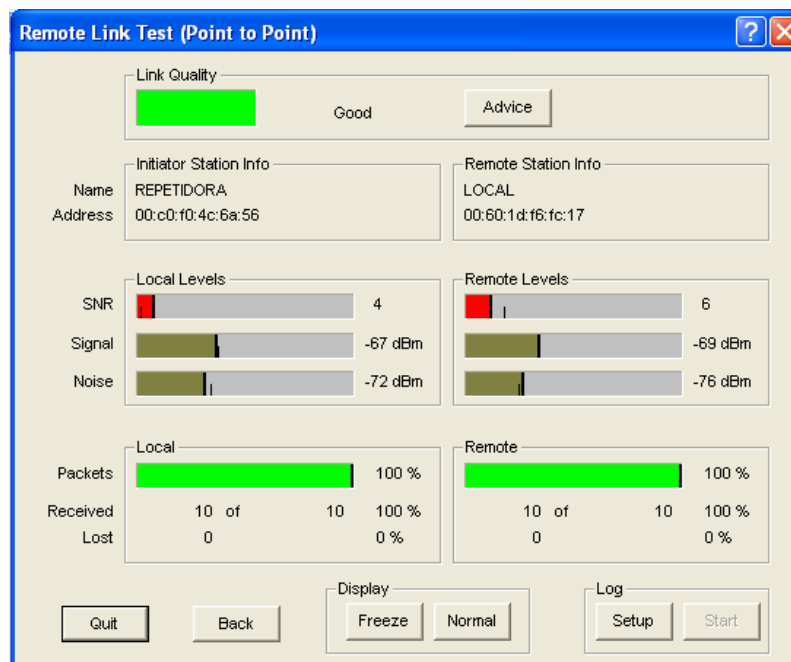


FIGURA 28 - Tela do *software* de Monitoramento do *link* entre Curitiba e São Luis do Purunã – sentido Repetidor-Sede.

Da comparação das FIGURAS 27 e 28, conclui-se que existem problemas de interferência nos dois sentidos do enlace pelos valores apresentados de SNR, porém no sentido Curitiba – Purunã a situação é ainda pior pela baixíssima porcentagem de pacotes recebidos no Repetidor.

O outro trecho compreendido entre o Repetidor e o Radar não apresentou nenhuma anormalidade, apesar de ter uma distância 60% maior que o enlace Curitiba – São Luis do Purunã, conforme pode ser visto nas FIGURAS 29 e 30, que apresentam as telas do *software* de monitoramento, nos sentidos Repetidor-Radar e Radar-Repetidor respectivamente.

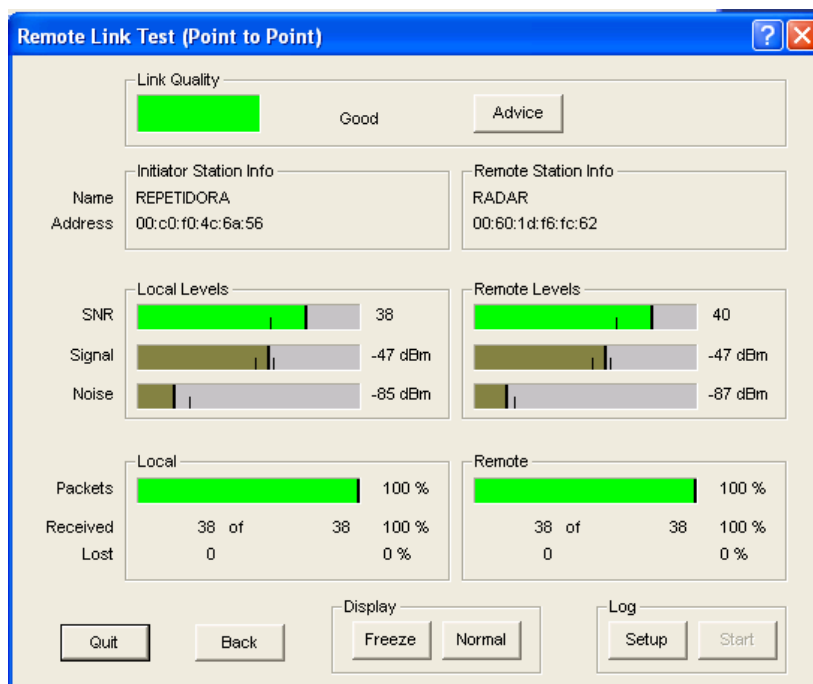


FIGURA 29 - Tela do *software* de Monitoramento do *link* entre São Luis do Purunã e Teixeira Soares – sentido Repetidor-Radar.

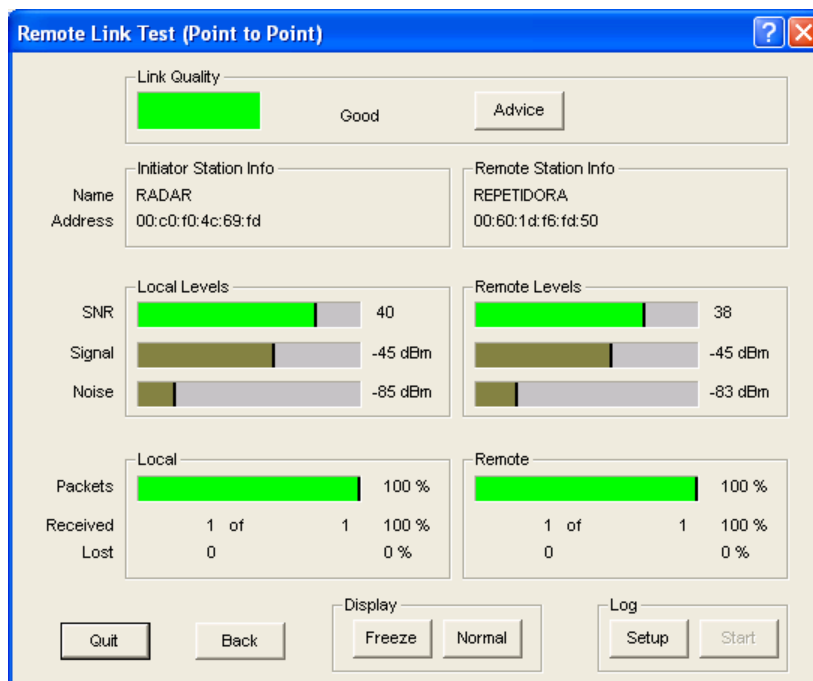


FIGURA 30 - Tela do *software* de Monitoramento do *link* entre São Luis do Purunã e Teixeira Soares – sentido Radar-Repetidor.

4.4 DADOS TÉCNICOS DO ENLACE

A TABELA 8 apresenta os dados geográficos dos dois trechos do enlace.

TABELA 8 - Parâmetros do rádio enlace

	Edifício Sede- Curitiba	Repetidor-SL Purunã	Radar-Teixeira Soares
Latitude (S)	25° 27' 5,3"	25° 27' 12,7"	25° 30' 22,2"
Longitude (W)	49° 14' 12,1"	49° 38' 44,2"	50° 21' 38,3"
Altitude (m)	932	1232	1100
Azimute (°)	288	108 / 284	103
Altura Antena (m)	40	20	27

A distância entre as estações de Curitiba a São Luis do Purunã é de 41,02km e São Luis do Purunã e Teixeira Soares a é de 73,38km. As poligonais dos enlaces entre as estações são apresentadas nas FIGURAS 31 e 32, respectivamente.

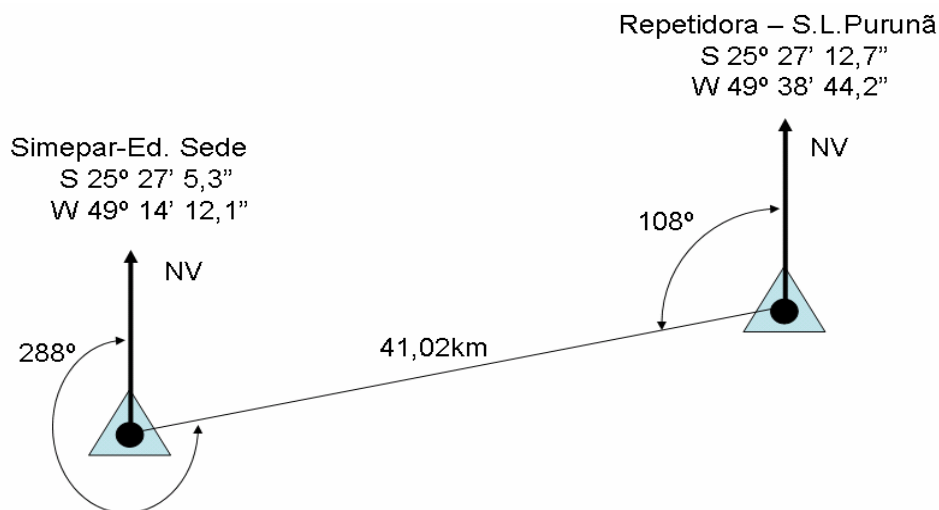


FIGURA 31 – Poligonal da Rota Edifício Sede – Repetidora em São Luis do Purunã

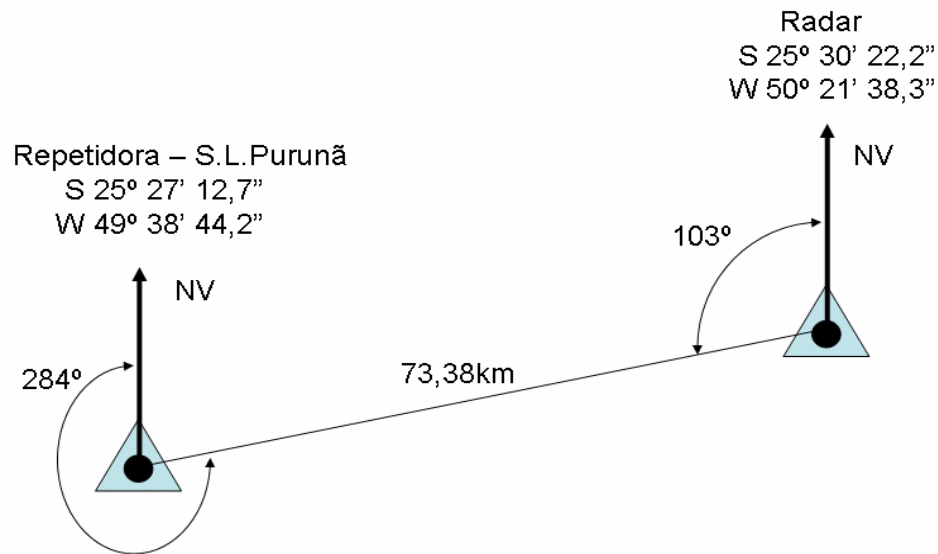


FIGURA 32 – Poligonal da Rota Repetidor São Luis do Purunã – Radar Teixeira Soares

As especificações técnicas completas do rádio digital utilizado nas três localidades, modelo *WaveLAN/IEEE Turbo 11Mb PC Card* encontram-se no Anexo I, destacando-se que a sua faixa de frequência de operação está situada entre os 2,400 até 2,4835GHz – compatível com o protocolo IEEE 802.11b, já descritas no capítulo 3. A sensibilidade de recepção máxima é de – 83dBm para 11Mbps e -94dBm para 1Mbps. A FIGURA 33 mostra o bastidor do equipamento o qual está instalado o rádio nas 3 localidades e a FIGURA 34 apresenta o esquema de ligação da placa com o sistema irradiante, composto de um injetor DC e respectiva fonte de alimentação de 12V, um amplificador com 30dBm de potencia de transmissão e 17dB de ganho de recepção e uma antena diretiva.



FIGURA 33 – Bastidor do equipamento

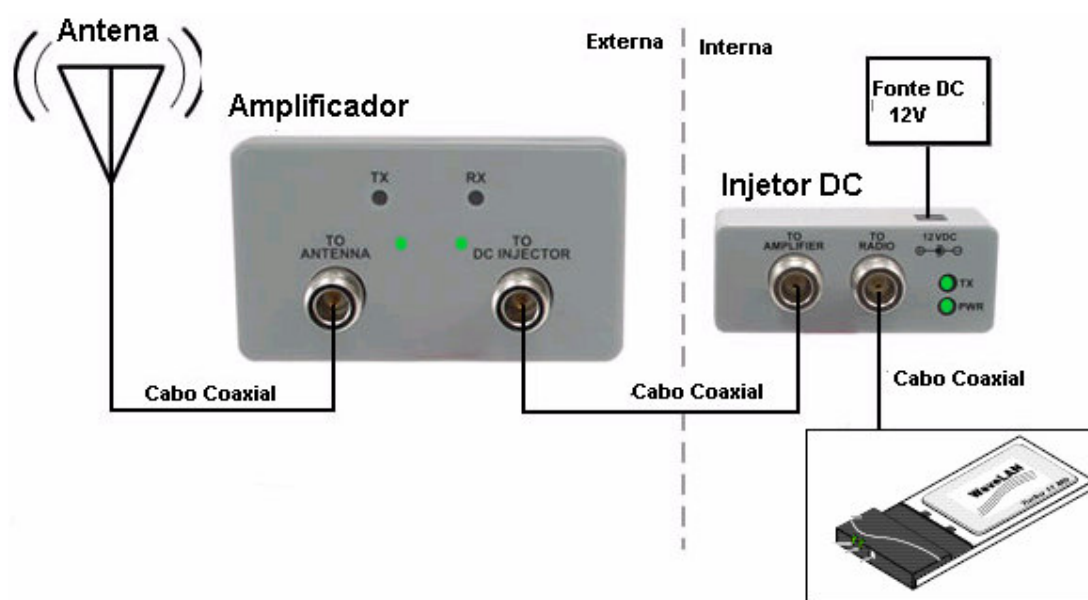


FIGURA 34 – Esquema de ligação dos equipamentos

As antenas empregadas no rádio enlace são as do tipo direcionais. Na estação repetidora de São Luis do Purunã existem duas antenas:

- No sentido Teixeira Soares: parabólica em alumínio de 1,2m de diâmetro com 26dBi de ganho e abertura de 3° em polarização horizontal, conforme mostra a FIGURA 35;

- No sentido Curitiba: semi-parabólica em alumínio vazada nas dimensões de 1 por 0,6 metros, com 24dBi de ganho e abertura de 8° em polarização horizontal, conforme modelo mostrado na FIGURA 36 e suas especificações técnicas encontram-se nos Anexo II e III;



FIGURA 35 – Antena Parabólica montada na torre de São Luis do Purunã, sentido radar (Teixeira Soares)



FIGURA 36 – Modelo da antena Semi-Parabólica montada na torre do Edifício Sede e no Repetidor de São Luiz do Purunã

Na estação de Teixeira Soares a antena é a mesma que se encontra em São Luis do Purunã sentido Radar e na estação da Sede é a mesma apresentada em São Luis do Purunã, sentido Sede.

O cabo coaxial utilizado é de 5/8" de diâmetro externo e dielétrico em espuma e apresenta uma atenuação de aproximadamente 14,5dB/100m (vide curva de atenuação no anexo IV) para a faixa de frequência utilizada. As distâncias encontradas para os lances deste cabo nas estações consideradas são de 10m em Curitiba (atenuação total de 1,4dB) e 30m em São Luis do Purunã (atenuação total de 4,3dB). Foram adotados os seguintes valores para as perdas por inserção: 0,2dB por conector e 0,5dB por injetor DC e 0,5dB por *jumper* da antena ao amplificador.

A TABELA 9 resume os valores para o enlace Curitiba (CWB) – São Luis do Purunã (SLP) a partir das considerações assumidas ao longo deste capítulo.

TABELA 9 – Consolidação do Enlace Curitiba – São Luis do Purunã

Frequência	2,4	GHz
Potência de transmissão	15,0	dBm
Amplificador (CWB+SLP)	60	dBm
Atenuação no cabo - CWB	1,4	dB
Atenuação no cabo - SLP	4,3	dB
Perdas de Inserção – CWB+SLP	5,4	dB
Sensibilidade do receptor a 1Mbps	-94	dBm
Diâmetro das antenas	1,2	m
Ganho das antenas	24	dBi
Distância total do enlace	41,02	km
Perda no espaço livre	132,26	dB
Atenuação pela chuva (0,0155dB/km)	0,64	dB
Atenuação pelos gases (0,0075dB/km)	0,31	dB
Perda total no percurso	133,21	dB

Para o cálculo da perda no espaço livre, utilizou-se a fórmula (1.2) e para o cálculo da atenuação por chuva e gases, foram obtidos os valores definidos nas normas ITU-R, conforme detalhado nos itens 3.6.5 e 3.6.6.

Para o cálculo da atenuação total líquida, utiliza-se a fórmula (3.16) e utilizando os dados da tabela acima, chega-se ao valor de 96,31dB. A seguir determina-se o valor do nível de recepção nominal através da fórmula (3.17), obtendo-se o valor de -51,31dBm. Assim, comparando-se este valor com a sensibilidade do receptor, entre -83dBm a -94dBm (dependendo da taxa de transmissão de dados – vide anexo I), nota-se que existe ainda uma margem de mais de 30dB para o pior caso, que

pode ser considerada a margem do desvanecimento ou *fading* do enlace. Utilizando o modelo da probabilidade de desvanecimento ITU-R P 530-8 [3], que leva em consideração as condições climáticas e topográficas no Brasil e em específico do estado do Paraná e conforme já detalhado no capítulo 3, obtemos o valor de 25% para o pior caso encontrado nos meses de fevereiro, maio, agosto e novembro.

4.5 SIMULAÇÃO DO RÁDIO ENLACE PELO *SOFTWARE*

No *software* CELPLANNER apresentado no item 4.2 existe um aplicativo específico denominado CELLINK [4], para a simulação de rádio enlaces de sistemas digitais fixos. Nele é possível escolher inclusive o tipo de protocolo a ser utilizado, no caso o 802.11b, pois assim a frequência de 2,4GHz já é selecionada.

Em seguida analisam-se as bases de dados e as propriedades do terreno da região a ser simulada.

Alguns dados que serão utilizados para a avaliação da viabilidade do sistema são: topografia do terreno, morfologia e mapas geográficos, contendo dados altimétricos, morfológicos e planimétricos. Os dados topográficos mostram as altitudes do terreno que devem ser levadas em conta para o posicionamento das estações transmissoras. Já os dados morfológicos contêm informações sobre alturas médias de prédios, casas, árvores, etc., onde serão atribuídos valores típicos de atenuação em dB/km na propagação do sinal inerentes aos obstáculos do terreno. O conhecimento destes tipos morfológicos é essencial nos procedimentos para predição do nível de sinal, pois são os principais elementos de obstrução do sinal que se situam sobre o relevo.

Para a simulação do *link*, devem-se posicionar os locais dos sistemas irradiantes. Para isso pode ser consultada uma carta topográfica ou outra base de dados de confiança. No caso deste trabalho, foram consultados os mapas de arruamento e zoneamento de Curitiba do IPPUC [5] (Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba), que contém as divisas de bairros, delimitação das quadras, denominações oficiais de vias e logradouros e sinalização de edificações referenciais. Convém

ressaltar que os dados geográficos cedidos pelo IPPUC foram implementados no *Software* pela CelPlanner que é a empresa desenvolvedora do programa. A FIGURA 37 mostra uma parte do mapa da região urbana de Curitiba que será usada para o dimensionamento.



FIGURA 37 - Mapa da região urbana de Curitiba.

O próximo passo consiste na delimitação da área de interesse a ser atendida que, conforme apresentado no item 3.5, é o trecho Curitiba – São Luis do Purunã, pois é o enlace que apresenta degradação de taxa de dados.

Após a inserção dos dados de latitude, longitude, azimute e altura das antenas destas duas localidades, conforme anteriormente apresentado na Tabela 5.1, o *software* já apresenta os locais devidamente posicionados no mapa de planimetria do terreno, conforme mostra a FIGURA 38.

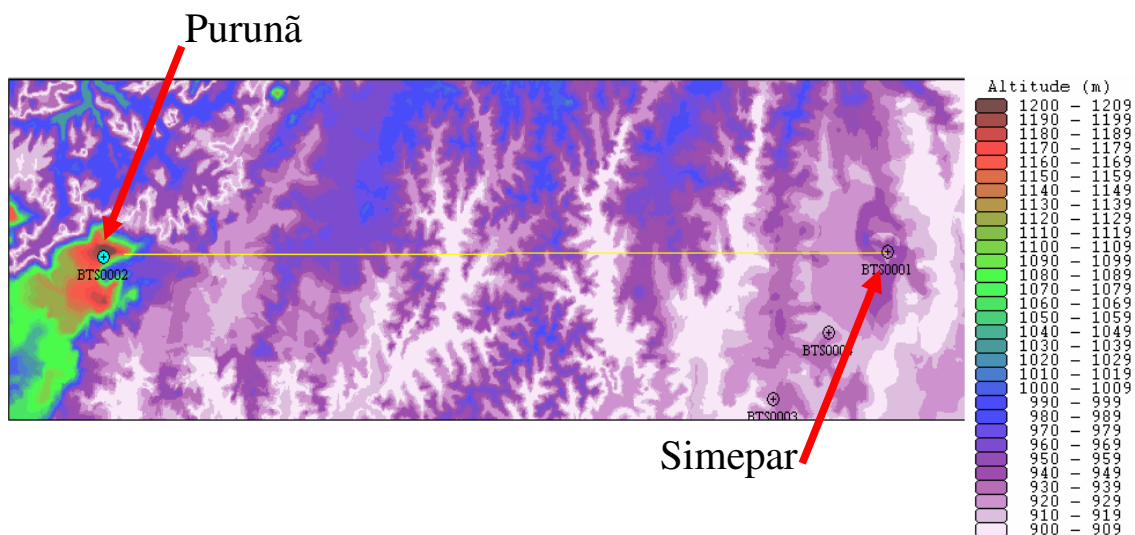


FIGURA 39 – Altimetria em 2D para o enlace (Fonte: Celplanner)

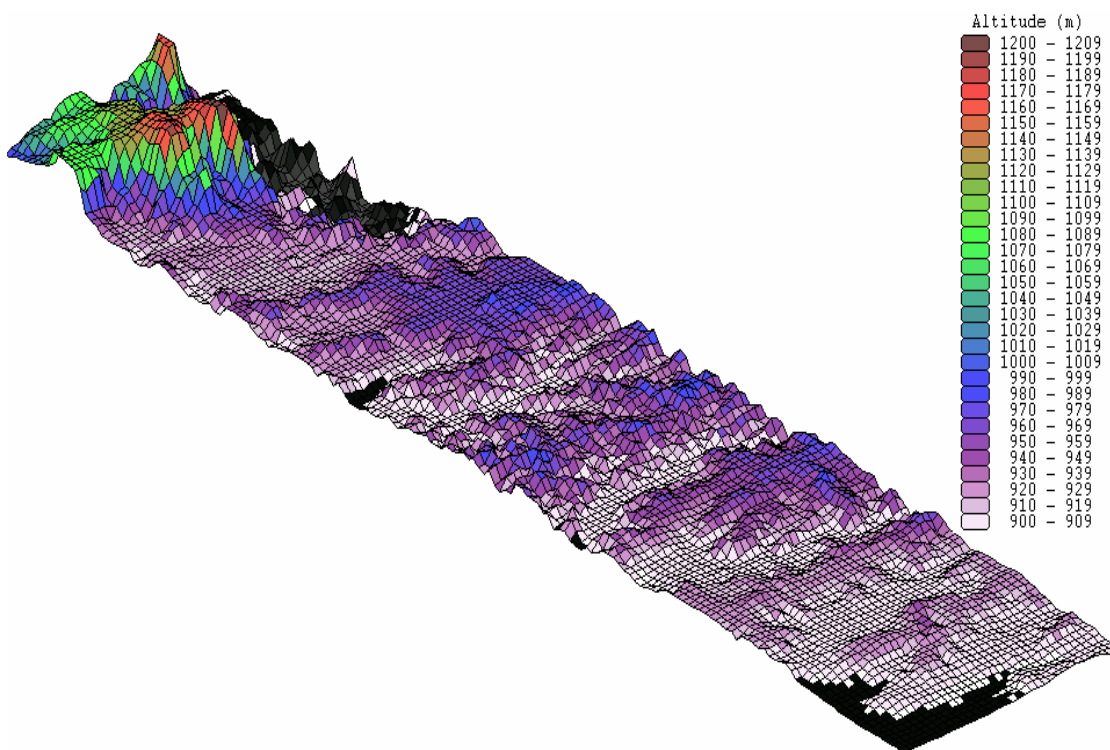


FIGURA 40 – Altimetria em 3D para o enlace (Fonte: Celplanner)

Das figuras expostas, conclui-se que o *software* apresenta excelente precisão em seus cálculos, pois leva em consideração variáveis relativas aos tipos de terreno,

como por exemplo, os rugosos com vários morros de pequena altitude, obtidas a partir dos bancos de dados de altimetria fornecidos pelo IPPUC.

As variáveis relativas ao tipo de vegetação, predominantemente baixa e média, são obtidas através da morfologia do terreno. Denomina-se base de dados de morfologia às informações que caracterizam a cobertura do terreno tais como água, vegetação, casas, avenidas e parques entre outros. A morfologia do terreno é importante, pois é levada em consideração no cálculo da perda de propagação; a atenuação causada no sinal é diferenciada em cada tipo morfológico, tal como visto no capítulo 3 – nos modelos de predição analisados, todos levam em consideração os aspectos morfológicos.

A base de dados de morfologia caracteriza as regiões em áreas por densidade populacional, mostrando a altura média das morfologias existentes no local. Os tipos mais comumente encontrados são a água, níveis de vegetação diferentes (rasteira, média e densa), área suburbana, área urbana e urbana densa. A FIGURA 41 apresenta a disposição da morfologia no enlace em análise.

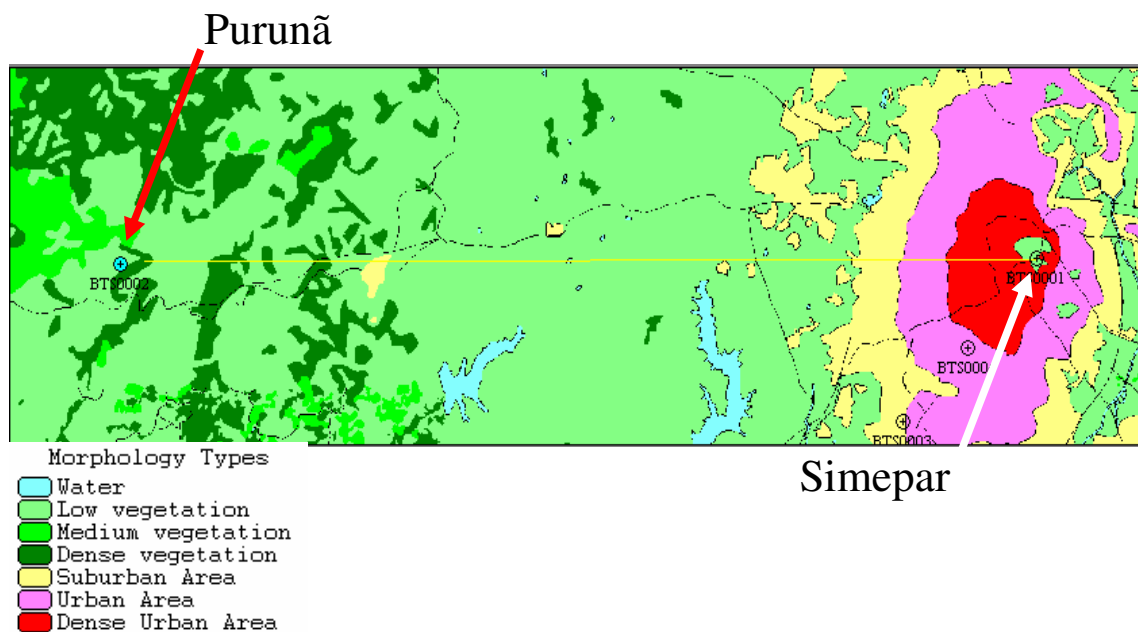


FIGURA 41 – Base de dados morfológicos do terreno do enlace (Fonte: Celplanner)

A região em vermelho representa a área urbana densa e é composta por muitos prédios que possuem diferentes alturas. Como representação desta área, toma-se a altura média de toda a região, considerando-se as edificações que constituem o meio. Já a região rosada, denominada de área urbana, é composta por árvores e casas e possui uma altura média menor. A FIGURA 42 mostra uma região típica na cidade de Curitiba, onde é possível diferenciar a área urbana da área urbana densa.



FIGURA 42 - Diferença entre a área urbana e a área urbana densa.

4.6 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO ENLACE

Esta etapa é de grande importância, pois serão configurados os parâmetros correspondentes a algumas características intrínsecas ao sistema. Entende-se por características intrínsecas os parâmetros físicos, tais como efeitos de propagação, atenuação em cada tipo de morfologia e frequência de utilização entre outros. Os parâmetros mais importantes considerados na simulação deste rádio-enlace encontram-se nas tabelas 7 e 8.

Foram escolhidos para os valores para $K=4/3$ para seu valor médio e de 0,72 como o valor mínimo, conforme detalhado no item 3.7.1.

Inseridos estes valores no *software* conforme apresentado na FIGURA 43, obtém-se os perfis apresentados nas FIGURAS 44 e 45 para a verificação da liberação da 1ª zona de Fresnel, utilizando os valores para K de 4/3 e 0,72 respectivamente, constatando que a primeira zona de Fresnel está 100 % livre de obstáculos.

Os relatórios completos de simulação gerados pelo *software* mostrando os diversos valores dos parâmetros de propagação se encontram nos Apêndices I e II, respectivamente para os valores de K iguais a 4/3 e 0,72.

The screenshot displays the 'CelPlan - Network Link' window. It is configured for a bidirectional wireless link between two sites:

- Site "A":** SIMEPAR, Radio Base Station. Azimuth (True): 269.6°, Azimuth (Magnetic): 287.5°, Vertical Inclination: -0.3° / -0.3°.
- Site "B":** PURUNÃ, Radio Base Station. Azimuth (True): 89.8°, Azimuth (Magnetic): 107.5°, Vertical Inclination: 0.3° / 0.3°.
- Link Type:** Bidirectional (A <-> B), Wireless.
- Distance:** 41.02 Km (25.48 miles).
- Objective:** ITU Quality Grade: Medium Grade Class 3 (50 Km).
- Multipath:** Model: ITU, Link Area: Inland Link, Terrain Type: High altitude (>700 m) Hills, Multipath Climatic Variable (pL): 20, Link Path Fraction Close to Water (%): 50.
- Earth Curvature:** Earth Radius Factor (K): 0.72.
- Gases Loss:** Atmospheric Pressure (hPa): 1013, Standard Temperature (°C): 15, Water Vapour Density (g/m³): 7.5.
- Rainfall:** Precipitation Model: ITU, Precipitation Rate @ 0.01% (mm/h): 120.

FIGURA 43 – Tela de dados do *Software Cellink*

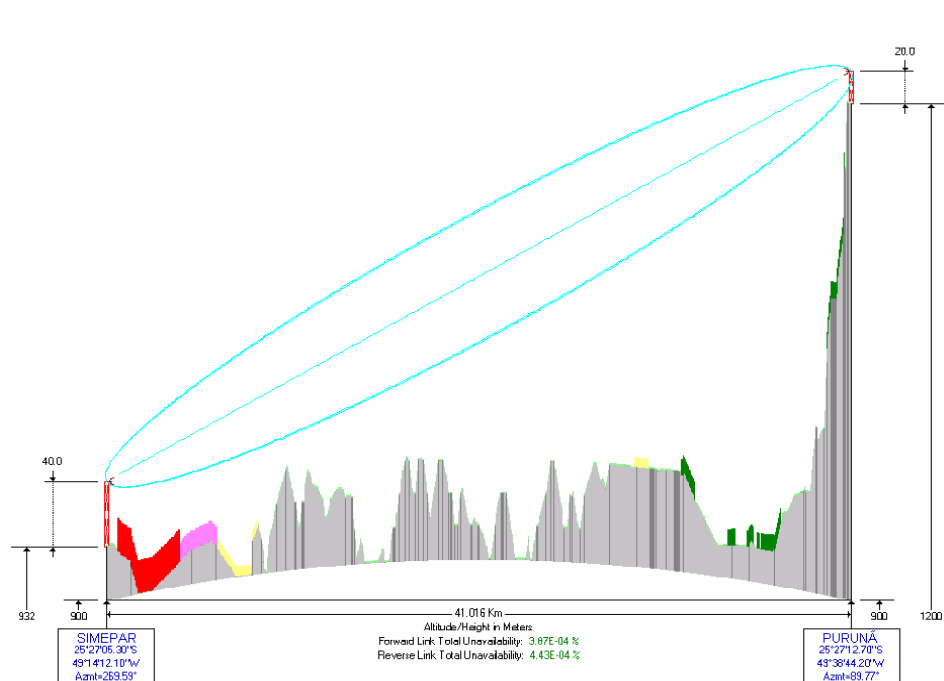


FIGURA 44 - Perfil do rádio-enlace para $K_{MÉD}=4/3$

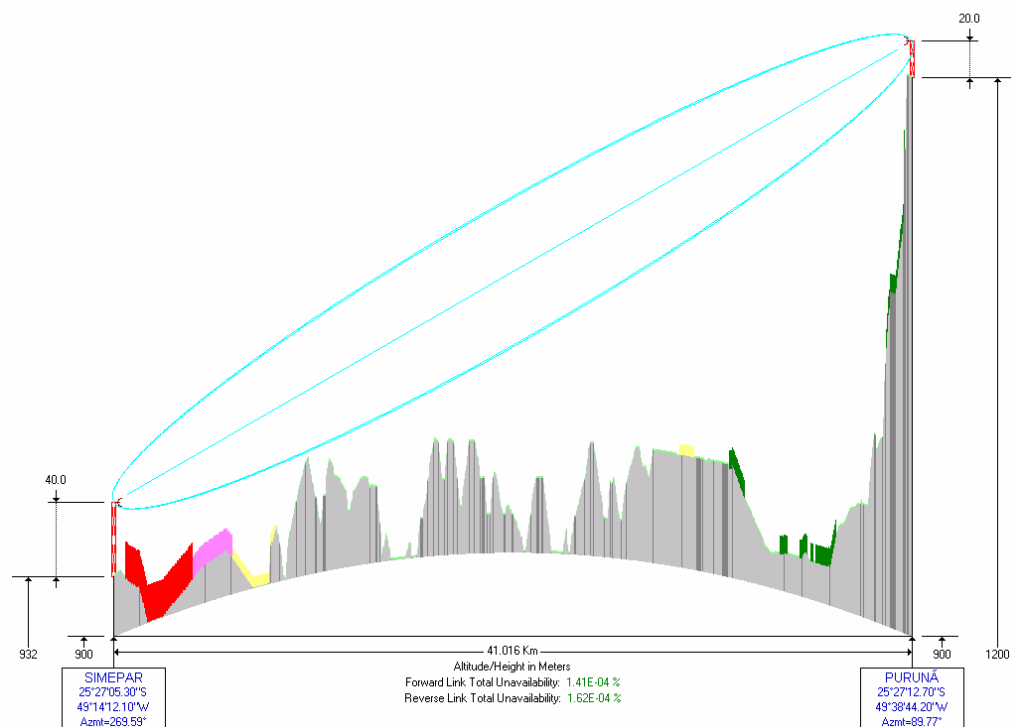


FIGURA 45 – Perfil do rádio-enlace para $K_{MÍN}=0,72$

Analisando os perfis do rádio enlace nota-se que, mesmo para o $K_{MÍN} = 0,72$ quando o raio de Fresnel se torna mais crítico em relação ao K_{MED} , conforme já esclarecido no item 3.6.2 do mesmo está liberado em 100% de seu percurso, deixando claro que o link se encontra dentro das condições mais severas.

4.6.1 PREDIÇÕES DE INTERFERÊNCIA

O nível de interferência do sistema deve ser mantido dentro de limites aceitáveis. Os sistemas devem possuir um nível de recepção acima de um limiar (normalmente o ruído gerado pelos componentes eletrônicos do receptor) para operar satisfatoriamente. Quando a potência no receptor abaixa deste limiar, o sistema opera com uma taxa de erro acima do seu limite, onde então se torna indisponível. As interferências são fontes que também degradam o sinal fazendo-o muitas vezes assumir valores inferiores ao limiar. O efeito causado então é uma degradação do desempenho do enlace.

4.7 RESULTADO DO ESTUDO DE CASO SIMEPAR

Devido à falta de uma documentação específica, tal como um Projeto Preliminar ou um Relatório Final de Prospecção, tornou-se necessária uma completa revisão da implantação do rádio enlace entre o Edifício Sede do Instituto SIMEPAR situado em Curitiba, e o seu radar meteorológico localizado em Teixeira Soares.

Dos cálculos realizados e apresentados na tabela 8 e das simulações efetuadas no *software* CelPlanner neste capítulo, conclui-se que o mesmo apresenta valores de um sistema considerado superdimensionado, conforme explicado no item 1.3, ou seja, apresenta valores com margem bem acima daquela considerada pelas normas, indicando que o problema não se encontra nos valores dos sinais transmitidos e recebidos e sim em ruídos e interferências.

Para se efetuar um estudo mais detalhado utilizando o referido *software* sobre a influência de ruídos e interferências de outros sistemas, conforme analisado nos itens 3.8.1 e 3.8.2, deve-se gerar um arquivo contendo a localização exata da fonte geradora de cada sinal interferente e a sua potência de transmissão, para então efetuar as simulações referentes a esta análise. Para a geração deste, procede-se um estudo em campo, com a utilização de equipamentos de localização e analisadores de espectro precisos.

Porém, observando que essa faixa de frequência apresenta a característica de não licenciamento junto a ANATEL, não há meios para que se possam obter informações dos sistemas cadastrados em seus bancos de dados; e há de se ressaltar que o crescimento da utilização dessa forma de rádio enlace vem crescendo muito, principalmente nas aplicações de Provedores de acesso para a Internet sem fio.

Uma solução técnica possível seria a da utilização de um equipamento do tipo Analisador Espectral com a função específica de demodulação no modo Espalhamento Espectral (*Spread Spectrum*), mas que além de apresentar um alto custo, sua venda é limitada a Agências Fiscalizadoras Governamentais das Telecomunicações e de Centros de Pesquisas renomados.

4.8 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados os passos considerados principais para o desenvolvimento de um sistema de comunicação sem fio, neste caso utilizando a tecnologia de Espalhamento Espectral em 2,4GHz. Foram analisados os dados do terreno e características da região atendida para a viabilização do projeto. A configuração dos parâmetros do sistema também foi descrita e constatou-se que o projeto do rádio enlace obtido é considerado coerente, ficando dentro dos padrões especificados.

Buscava-se a confirmação de que o rádio enlace entre a sede do Instituto SIMEPAR e seu radar meteorológico opera dentro das normas que regem um sistema em radiovisibilidade, que foi atestada através de cálculos e simulações.

4.9 REFERÊNCIAS

- [1] CELTEC. **Manual de treinamento da ferramenta de planejamento de RF CelPlanner**. Campinas, Brasil. Dez. 2002. 61 p.
- [2] WAVELINK. **Bridge/Router contion manual**. Revisão 2.1. USA, 2000. 24 p.
- [3] ITU – T. RECOMMENDATION ITU-R P. 530-08, **Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Line-of-Sight Systems**. ITU – T tech. rep. Genebra, Suíça. 1997.
- [4] CELTEC. **Manual do usuário – Cellink** – versão 1.25, Campinas, Brasil. 2003. 112 p.
- [5] IPPUC (Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba). **Mapa e Lei de zoneamento - Mapa de Arruamento**, Curitiba Digital. Curitiba, Brasil. 2001.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo tem como principal objetivo a apresentação dos resultados das predições executadas no capítulo anterior bem como a apresentação das conclusões sobre este estudo. Serão apresentadas, também, propostas para trabalhos futuros, que poderão dar continuidade a esta linha de pesquisa.

5.1 CONCLUSÃO

Os serviços de telecomunicações e de informática estão voltados cada vez mais para a mobilidade, caracterizados pela convergência de dados, voz e imagem, levando com isso a atualização do espectro para a transmissão destas informações em banda larga. O provedor destes serviços se depara com o grande desafio de ter de oferecer bandas sempre maiores, por preços menores devido a concorrência que o mercado atualmente apresenta. Desta forma, ao escolher o meio à ser utilizado, deve-se levar em conta o imediato retorno de investimento em infra-estrutura da rede, o que se traduz em rapidez na instalação e na redução dos custos da implantação e na manutenção desta rede.

Historicamente o protocolo IEEE 802.11 foi desenvolvido para aplicações internas, nas redes locais em escritórios para o uso na computação móvel, onde um acesso de 11Mbps é adequado. Mas para um enlace de rádio frequência com a utilização desta tecnologia, algumas questões precisam ser estudadas com cuidado. Quando se trata das velocidades em redes sem fio, é importante entender que a taxa de dados informada não é a mesma na prática. E a causa primária disto tem a ver com o protocolo e o cabeçalho (*overhead*) associado. A forma como o protocolo CSMA/CA, conforme já detalhado no item 2.6.4, que ocasiona os cabeçalhos adicionais devido a necessidade de sincronização de estações e pré-aprovação de transmissão para evitar a colisão, reduz a taxa de transmissão real de um canal do 802.11b para aproximadamente 50% de sua prometida taxa de dados.

Como as redes *Ethernet*, as redes sem fio são baseadas no protocolo CSMA, mas diferentemente da *Ethernet* que utiliza a detecção da portadora – onde os dados são retransmitidos se uma colisão é detectada, os sistema *wireless* evitam a colisão – onde os dados só são enviados quando o meio estiver livre. Esse protocolo, o CSMA/CA não atua de forma bidirecional e sim semi-duplex, portanto a sua velocidade cai sensivelmente na prática e quanto mais tráfego, mais essa velocidade cairá devido as colisões. A modulação OFDM melhora um pouco esse desempenho.

Embora na rede sem fio as estações participantes não consigam saber se ocorreu uma colisão em algum lugar; então as estações devem supor que sempre ocorre colisão, a não ser que seja especificamente notificado que não houve. Essa notificação toma a forma de uma mensagem de confirmação positiva (ACK).

O desafio é oferecer um *link* de dados de alto desempenho, confiável e que mantenha a alta taxa de dados, apesar dos restritos níveis de energia do receptor, do enfraquecimento do canal devido às reflexões de múltiplos trajetos e da interferência de outros dispositivos. Algumas novas tecnologias são propostas atualmente para aproveitar as vantagens do efeito multipercurso que um canal das redes *wireless* apresenta. Entre elas destacam-se a tecnologia MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) que utiliza várias antenas para transmissão e recepção, a utilização da modulação em OFDM, a utilização de técnicas de modulações estendidas, altas taxas de largura de banda, codificações avançadas e o aperfeiçoamento da camada de enlace MAC. Tudo para oferecer um sistema com uma capacidade de canal maior.

O protocolo 802.11 especifica parâmetros para as camadas de rede física – PHY e de enlace – MAC. A camada física, que na realidade opera a transmissão de dados entre os nós, utiliza modulações por posições dos pulsos nas técnicas de *Spread Spectrum* por sequência direta – DSSS ou por saltos de frequência – FHSS, ou ainda por infravermelho. A chave para o desempenho dos enlaces em rádio está na camada MAC, pois é a parte do rádio que gerencia o protocolo e a utilização do enlace aéreo. É responsável também pela autenticação, associação, re-associação e transferência de dados. Utiliza a técnica CSMA/CA que é adequada quando existem poucos canais na rede, e se muitos forem inseridos e com alta taxa de dados, o CSMA/CA coloca várias

limitações no desempenho da rede, pois os nós ao tentarem enviar todos ao mesmo tempo, entrarão no modo de evitar a colisão, impactando drasticamente na velocidade de transmissão.

Para a análise de desempenho das redes sem fio devem ser verificados os seguintes pontos:

Integridade da transmissão – dada pela maior taxa de transferência de dados em função da distância, sob ambientes com interferências. Neste item deve-se ressaltar a importância da melhora da sensibilidade dos receptores, pois aumentando a potência de transmissão em uma rede, se somam interferências também. E isso num ambiente crescente de frequências não licenciadas, a taxa de transferência fatalmente irá decair. E a sensibilidade (ou sensibilidade) de recepção do rádio se torna mais imune as interferências de ruídos próximos.

Existência de linha de visada - Cálculo da perda no espaço livre e liberação da zona de Fresnel. Nível da relação sinal-ruído adequado;

Estudo do ambiente que envolve a rede em termos de sinais sem fio – fontes de interferência, riscos para a propagação por multipercurso e as interferências intersímbolo;

Planejamento dos ajustes dos parâmetros de uma WLAN – interferências de co-canal e canal adjacente, plano de frequência e níveis de potência transmitida, decisão do uso do RTS/CTS é possível/necessário.

Alternativa de equipamentos, instalação – verificação de riscos com nós ocultos e o planejamento para a setorização dos pontos de acesso - APs.

A grande vantagem desta tecnologia está em se trabalhar nas faixas de frequências não licenciadas – isentas de taxas de instalação e operações anuais, os custos dos equipamentos dos rádios são menores graças a sua interoperabilidade. Entretanto, esta aparente economia deve ser cuidadosamente avaliada no que diz respeito à degradação do desempenho e a qualidade de serviços (*QoS*) ou redução da disponibilidade desta rede em um ambiente público, especificamente no meio urbano denso.

O Protocolo 802.11 originalmente não foi concebido para ser operado em grandes distâncias. O raio medido da camada MAC foi projetado para operar em distâncias de algumas centenas de metros. Na prática grandes distâncias podem ser conseguidas através da utilização de potências maiores nos transmissores e de antenas diretivas, mas sem garantia da manutenção de uma taxa de dados constantes, principalmente em um meio urbano denso propício ao surgimento crescente de novas fontes de interferência. Apesar da característica natural da tecnologia de Espalhamento Espectral conseguir funcionar adequadamente em ambientes agressivos do ponto de vista eletromagnético, caso o nível de sinal recebido esteja muito abaixo do limiar do receptor, o protocolo de rádio é solicitado a repetir o envio das informações, acarretando uma redução da taxa de transmissão, que se confirmou no histórico do enlace analisado do SIMEPAR, onde no início da implantação o mesmo apresentava um taxa de aproximadamente 1Mbps e atualmente não passa de 10kbps, apesar da primeira zona de Fresnel estar totalmente desobstruída, conforme observado na simulação do *software* de predição;

A tecnologia tende sempre a andar a um passo da regulamentação, ou seja, existem fatores limitantes que a ANATEL regulamenta para a utilização da frequência de 2,4GHz, que apesar de ser uma frequência não regulamentada e, por conseguinte de uso não exclusivo, tem sido causa de atuais estudos e alterações por parte deste órgão regulamentador, devido ao crescimento acentuado de implantações que estes sistemas vêm apresentando e as também crescentes reclamações que outros sistemas que operam em frequências próximas e licenciadas estão tendo pelo não respeito aos limites de potência estipulados, que reduz ainda mais a confiabilidade dos sistemas ora estudados. A Resolução 397 da ANATEL, publicada no dia 6 de abril de 2005, regulamenta a utilização da faixa de 2,4GHz em cidades com mais de 500 mil habitantes, portanto uma área urbana densa.

Portanto, apesar das claras vantagens de custo e rapidez de instalação e operações que inicialmente ressalta, a escolha da utilização do Protocolo IEEE 802.11b – *Wi-Fi* em enlaces ponto-a-ponto deve ser feito após uma criteriosa análise envolvendo o estudo e simulação da radiovisibilidade dos pontos a serem interligados, e o tipo de área envolvida – se rural, suburbana ou urbana para determinação das fontes de interferências, levando-se em conta que será uma solução temporária que não apresenta garantia nenhuma de desempenho e disponibilidade a longo prazo.

5.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Como perspectivas futuras para o desenvolvimento deste trabalho são feitas as seguintes sugestões:

- Estudo de parâmetros de Qualidade de Serviço (*QoS*) para um enlace ponto-a-ponto operando na faixa de frequência não licenciada de 2,4GHz;
- Estudo comparativo da tecnologia aqui analisada – *Wi-Fi*, com o novo protocolo proposto pelo IEEE 802.16 – *WiMax*, sendo uma interface aérea para sistemas de acesso sem fio fixo para banda larga;
- Realização de testes em campo para implementação de alguns dos modelos de predição para enlaces ponto-a-ponto utilizando a faixa de 2,4GHz, obtendo os parâmetros para calibração dos modelos para a cidade de Curitiba.

REFERÊNCIA GERAL

Referências Utilizadas nos Capítulos

CAPÍTULO 1

- [01] SIQUEIRA, Ethevaldo. **Três momentos da história das telecomunicações no Brasil**. Dezembro Editorial. São Paulo, Brasil. 1997. 108 p.
- [02] PICQUENARD, Armel. **Complementos de telecomunicações**. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. 1976. 333 p.
- [03] NASCIMENTO, Juarez. **Telecomunicações**. Makron Books, São Paulo, Brasil. 2000. 340 p.
- [04] WALDMAN, Helio. YACOUN, Michel. **Telecomunicações: Princípios e Tendências**. Érica. São Paulo, Brasil. 1997. 287 p.
- [05] PEGRAM, T.W., MOLYNEUX-BERRY, R.B., BOSWELL, A.G.P. The Coherer Era. The Original Marconi System of Wireless Telegraphy. **GEC Review**, vol. 12, n. 2, 1997, pp. 83 – 116.
- [06] BARRADAS, Ovídio. **Sistemas em Radiovisibilidade**. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, Brasil. 1978. 693 p.
- [07] ITU – T. RECOMMENDATION ITU-R 525-2. **Calculation of Free-Space Attenuation**, ITU – T. Genebra, Suíça. 1994.
- [08] BONDYOPADHYAY, P.K. Introduction to radio communication. **Proceedings of the IEEE**, vol. 86, n. 10, pp. 2090-2109, Out. 1998.
- [09] CORAZZA, G.C. Marconi's history. **Proceedings of the IEEE**, vol. 86, n. 7, pp. 1307-1317, Jul. 1998.
- [10] PICKHOLTZ, R.L., SCHILLING, D.L., MILSTEIN, L.B. Theory of *Spread Spectrum* Communications-A Tutorial. **IEEE Transactions on Communications**, vol. COM-30, n. 5, pp. 855-884, Mai 1982.
- [11] IEEE-AS Standards Board, IEEE std 802.11, **LAN/MAN STANDARDS COMMITTEE of the IEEE Computer Society**, 528 p., ed. 1999 (R 2003).

- [12] ANATEL, Resolução n. 365 – Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita, **Anexo a Resolução n. 365**, 28 p., Mai. 2004.

CAPÍTULO 2

- [01] TANENBAUM , Andrew. **Redes de computadores**. Campus. São Paulo, Brasil. 2003. 945 p.
- [02] BERNAL, Paulo Sérgio. **Comunicações Móveis: Tecnologias e Aplicações**. Érica. São Paulo, Brasil. 2002. 204 p.
- [03] HONG, H.Y. A Starlet's Secret Life as Inventor. **IEEE Microwave Journal**, vol. 42, n. 2, pp. 70-74. Fev. 1999.
- [04] SCHOLTZ, R.A. The Origin of Spread Spectrum Communications. **IEEE Transactions on Communications**, vol. COM-30, n. 5, pp. 39-44, Mai. 1982.
- [05] DIXON, R.C. Why spread spectrum. Reprint from **IEEE Communications Society Magazine**, vol. 13, pp. 21-25, Jul. 1975.
- [06] UTLAUT, W.F. Spread Spectrum Principles and Possible Application to Spectrum Utilization and Allocation. **ITU Telecom Journal** , vol. 45, pp. 20-32, Jan 1978, reprint from IEEE Communications Society Magazine, vol.16, n. 5, pp. 21-31, Set. 1978.
- [07] SPASOJEVIC, Z., BURNS , J. Performance Comparison of Frequency Hopping and Direct Sequency Spread Spectrum Systems in the 2,4GHz Range. **IEEE Communications Magazine**, vol. 39, n. 10, pp. 124 – 132, Out. 2001.
- [08] SCHILING, L.D. Spread Spectrum for Personal Communications. **IEEE Microwave Journal**, pp. 26-33. , Set. 1991.
- [09] NEE, R; AWATER, G. New High-Rate Wireless LAN Standards. **IEEE Communications Magazine**, vol. 37, n. 12, pp.82-88, Dez. 1999.
- [10] IEEE-AS Standards Board, IEEE Std 802.11 - WIRELESS LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications, **LAN/MAN**

- STANDARDS COMMITTEE of the IEEE Computer Society**, 528 p., ed. 1999 (R 2003).
- [11] IEEE-AS Standards Board, IEEE Std 802.11 - WIRELESS LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band. **LAN/MAN STANDARDS COMMITTEE of the IEEE Computer Society - IEEE Standard 802.11a**, 91 p., ed. 1999 (R 2003).
- [12] IEEE-AS Standards Board, IEEE Std 802.11 - WIRELESS LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band. **LAN/MAN STANDARDS COMMITTEE of the IEEE Computer Society - IEEE Standard 802.11b**, 96 p., ed. 1999 (R. 2003).
- [13] ANATEL, Resolução n. 397 – Regulamento sobre Uso de Radiofrequências na Faixa de 2.400MHz a 2.483,5MHz por Espalhamento Espectral ou Tecnologia de Multiplexação Ortogonal por Divisão de Frequência. **Anexo a Resolução n. 397**, 4 p. Mai 2004.

CAPÍTULO 3

- [01] ITU – T. RECOMMENDATION ITU-R P.530-09, **Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Line-of-Sight Systems**, ITU – T tech. rep. Genebra, Suíça. 1994.
- [02] ANDERSON, Harry. **Fixed broadband wireless system design**. Jonh Wiley & C Chicago, USA. 2003. 516 p.
- [03] ATHANASIADOU, G. E; NIX, A. R; MCGEEHAN, J. P. A Microcellular Ray-Tracing Propagation Model and Evaluation of its Narrowband and Wideband Prediction. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications.**, vol. 18, n. 3, p.322-335. Mar. 2000.
- [04] LOYOLA, J. **Propagation models for urban environment**. Disponível em: <http://www.wtec.org/wireless/04_02.htm>. Acesso em 03 de maio de 2005.

- [05] NESKOVIC, A; NESKOVIC, N; PAUNOVIC,D. A Field Strength Prediction Model Based on Artificial Neural Networks. **9 ed. IEEE Med. Electro. Conf. MELECON**, Tel Aviv, Israel. Mai. 1998.
- [06] PERRAULT, O; ROSSI, J.P.; BALANDIER, T. Predicting Field Strength with a Neural Ray-Tracing Model. **Proc. IEEE GLOBECOM**, London, England. Nov. 1996.
- [07] TAN, S. Y.; TAN, H.S. A Microcellular Communications Propagation Model Based on the Uniform Theory of Diffraction and Multiple Image Theory. **IEEE Trans. Ant. and Prop.**, v.44, n 10, pp. 1317-1326. Out. 1996.
- [08] ERCEG, V.; HARI, K.S.; et al., Channel models for fixed wireless applications. tech. rep., **IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group**. Jan. 2001.
- [09] ITU–T. RECOMMENDATION ITU-R P.526-07, **Method for Propagation by Diffraction**. ITU – T tech. rep. Genebra, Suíça. 1999.
- [10] ITU – T. RECOMMENDATION ITU-R P. 838, **Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling**. ITU – T tech. rep. Genebra, Suíça. 1999.
- [11] ITU – T. RECOMMENDATION ITU-R P. 676-04, **Attenuation by atmospheric gases** . ITU – T tech. rep. Genebra, Suíça. 1999.
- [12] ITU – T. RECOMMENDATION ITU-T G. 821, **Error Performance of an International Digital Connection Operating at a Bit Rate Below the Primary Rate and Forming Part of an Integrated Services Digital Network**. ITU – T tech. rep. Genebra, Suíça. 1996.
- [13] ITU – T. RECOMMENDATION ITU-T G. 826, **Error Performance Parameters and Objectives for International. Constant Bit Rate Digital Paths at or Above the Primary Rate**. ITU – T tech. rep. Genebra, Suíça. 1999.
- [14] XU, S.; SAADAWI, T. Does the IEEE 802.11 MAC protocol work well in multihop wireless ad hoc networks?, **IEEE Communications Magazine**, vol.39, no. 6, pp. 130-137. Jun. 2001.

- [15] LEUNG, K. K.; MCNAIR, 0B.; CIMINI, L. J.; WOMTERS, J. H. Outdoor IEEE 802.11 Cellular Networks: MAC Protocol Design and Performance, **ICC 2002 - IEEE International Conference on Communications**, vol. 25, no. 1, pp. 595 – 599. Abr. 2002.
- [16] ZANELLA, A; PELLEGINI, F.de. Statistical Characterization of the Service Time in Saturated IEEE 802.11 Networks, **IEEE Communications Letters**, vol. 9, no. 3, pp. 225-227. Mar. 2005.
- [17] FOH, C.H.; TANTRA, W. Comments on IEEE 802.11 Saturation Throughput Analysis with Freezing of Backoff Counters, **IEEE Communications Letters**, vol. 9, no. 2, pp. 130-132. Fev. 2005.
- [18] DUFFY, K.; MALONE, D.; LEITH, D.J.. Modeling the 802.11 Distributed Coordination Function in Non-Saturated Conditions, **IEEE Communications Letters**, vol. 9, no. 8, pp. 715-717. Ago. 2005.
- [19] KIM, J.H.; LEE, J.K.. Throughput and Packet Analysis of IEEE 802.11 MAC Protocols for Wireless LANs, **Proceeding of MDMC '96**, Seoul, Korea. pp. 530-535, 1996.
- [20] BALAKRISHNAN, H.; BARRET, C.L.; KUMAR, V.S.; et al. The Distance-2 Matching Problem and Its Relationship to the MAC-Layer Capacity of Ad Hoc Wireless Networks, **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, vol. 22, no. 6. Ago 2004.
- [21] HEUSSE, M.; ROUSSEAU, F.; BERGER-SABBATEL, G.; DUDA, A.. Performance Anomaly of 802.11b, **Proceeding of IEEE INFOCOM**, pp. 836-843. Abr. 2003.
- [22] KIM, H., YONN, S.; KANG, I. Resolving 802.11 performance anomaly through service differentiation, **IEEE Communications Letters**, vol. 9, no. 7, pp. 655-663. Jul. 2005.
- [23] GAWTHOP, P.E.; SANDERS, F.H; SELL, J.J. Radio Spectrum Measurements of Individual Microwave Ovens, **NTIA Report 94-303-1**, vol. 1. Mar. 1994.

- [24] INTERSIL CORPORATION. Effects of Microwave Interference On IEEE 802.11WLAN. Reliability, **Submission to IEEE P802.11Wireless LANs**, pp. 1-22. Mai. 1998.
- [25] JO, J.H.; JAYANT, N. Performance Evaluation of Multiple IEEE 802.11b WLAN Stations in the Presence of Bluetooth Radio Interference, **IEEE International Conference on Communications, ICC '03**, vol.2, pp.1163-1168. Mar. 2003.
- [26] CHIASSERINI, C.F.; RAO, R.R. Coexistence Mechanisms for Interference Mitigation in the 2,4GHz ISM Band, **IEEE Transaction on Wireless Communications**, vol. 2, no. 5, pp. 964-975. Set. 2003.
- [27] LANSFORD, J.; STEJHPHENS, A.; NEVO, R. Wi-Fi (802.11b) and Bluetooth: Enabling Coexistence, **IEEE Network**, vol. 15, no. 5, pp. 20-27. Set/Out. 2001.
- [28] ITU – T. RECOMMENDATION ITU-R F. 1330-01, **Performance Limits for Bringing into Service of the Parts of International Plesiochronous Digital Hierarchy and Sincronous Digital Hierarchy Paths and Sections Implemented by Digital Radio Relay Systems**. ITU – T tech. rep. Genebra, Suíça. 1999.

CAPÍTULO 4

- [1] CELTEC. **Manual de treinamento da ferramenta de planejamento de RF CelPlanner**. Campinas, Brasil. Dez. 2002. 61 p.
- [2] WAVELINK. **Bridge/Router contion manual**. Revisão 2.1. USA, 2000. 24 p.
- [3] ITU – T. RECOMMENDATION ITU-R P. 530-08, **Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Line-of-Sight Systems**. ITU – T tech. rep. Genebra, Suíça. 1997.

[4] CELTEC. **Manual do usuário – Cellink** – versão 1.25, Campinas, Brasil. 2003.
112 p.

[5] IPPUC (Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba). **Mapa e Lei de zoneamento - Mapa de Arruamento**, Curitiba Digital. Curitiba, Brasil. 2001.

APÊNDICE I

APÊNDICE I – Relatório de Simulação Completo Gerado pelo *Software* Cellplan
para $K_{\text{méd}} = 4/3$

Site:	BTS0001	BTS0002
Type:	Cell Site	Cell Site
Latitude:	25°27'05.3"S	25°27'12.7"S
Longitude:	49°14'12.1"W	49°38'44.2"W
Altitude (m):	932	1200
	Forward Link	Reverse Link
Transmission Site:	BTS0001	BTS0002
Reception Site:	BTS0002	BTS0001
Radio Type:	NetRadio0001	NetRadio0001
Modulation Scheme:	DPSK-8	DPSK-8
Bandwidth (MHz):	5	5
Roll-Off Factor:	0.2	0.2
Coding Gain (dB):	0	0
Channel Overhead (%):	20	20
Reference Temperature (°K):	290	290
Receiver Noise Figure (dB):	5	5
Maximum Data Rate (Mbps):	10	10
Symbol Rate (Ms/s):	12.5	12.5
Required Bit Error Rate:	BER 10-3	BER 10-6
Service Threshold (dBm):	-91	-90
Carrier to Noise Ratio (dB):	10.985	11.985
Cross Polarization Improvement Factor (dB):	20	20
Receiver Equalization Signature Factor:	0.1	0.1
Frequency Plan:	ITU-R 283-5 (6/14)	ITU-R 283-5 (6/14)
Frequency Channel:	Ch 1 2491.5 MHz	Ch 1' 2610.5 MHz
Center Frequency (MHz):	2491.5	2610.5
Channel Bandwidth (MHz):	14	14
Link Polarization:	Horizontal	Horizontal
Transmission Power (dBm):	30	30
Transmission Losses (dB):	5	5
Transmission Antenna:	Simepar	Simepar
Transmission Antenna Height (m):	40	20
Transmission Antenna Gain (dBd):	24	24
Transmission Antenna Gain (dBi):	26.14	26.14
Transmission Power EIRP (dBm):	51.14	51.14
Reception Losses (dB):	5	5
Reception Antenna:	Simepar	Simepar
Reception Antenna Height (m):	20	40
Reception Antenna Gain (dBd):	24	24
Reception Antenna Gain (dBi):	26.14	26.14
Link Distance (m):	41015.793	41015.793
Azimuth - True (°):	269.593	89.769

Azimuth - Magnetic (°):	287.538		107.456	
Transmission Inclination (°):	-0.346		0.346	
Reception Inclination (°):	-0.346		0.346	
Free Space Distance (m):	41016.543		41016.543	
Center Frequency (MHz):	2491.5		2610.5	
Free Space Loss (dB):	132.628		133.034	
Earth Radius Factor:	4/3			
Effective Radius (m):	8502056			
Diffraction Loss (dB):	0		0	
Atmospheric Pressure (hPa):	1013		1013	
Standard Temperature (°C):	15		15	
Water Vapour Density (g/m³):	7.5		7.5	
Atmospheric Gases Loss (dB):	0.294		0.296	
Total Path Loss (dB):	132.922		133.33	
Reception Signal Level (dBm):	-60.642		-61.05	
Service Threshold (dBm):	BER 10-3 -91	BER 10-6 -90	BER 10-3 -91	BER 10-6 -90
Link Gross Margin (dB):	30.358	29.358	29.95	28.95
Objective ITU Quality Grade:	Medium Grade Class 3 (50 Km)			
Multipath Model:	ITU			
Multipath Link Area:	Inland Link			
Multipath Terrain Type:	High altitude (>700 m) Hills			
Multipath Climate Variable:	20			
Multipath Occurrence Factor:	3.33E-01		3.47E-01	
Fading Outage (%):	BER 10-3 3.07E-04	BER 10-6 3.86E-04	BER 10-3 3.51E-04	BER 10-6 4.42E-04
Selective Fading Outage (%):	6.06E-07	6.06E-07	6.25E-07	6.25E-07
Composite Fading Outage (%):	3.08E-04	3.87E-04	3.52E-04	4.43E-04
ITU Error Performance Objective (%):	2.00E-03	1.60E-01	2.00E-03	1.60E-01
Fading Outage (s/Month):	8.067	10.155	9.236	11.628
Selective Fading Outage (s/Month):	0.016	0.016	0.016	0.016
Composite Fading Outage (s/Month):	8.083	10.171	9.253	11.644
ITU Error Performance Objective (s/Month):	52.56	4204.8	52.56	4204.8
Precipitation Model:	ITU			
Precipitation Rate @ 0.01% (mm/h):	120			
Rainfall Attenuation (dB):	0.204		0.236	
Unavailability due to Rain (%):	BER 10-3 0.00E+00	BER 10-6 0.00E+00	BER 10-3 0.00E+00	BER 10-6 0.00E+00
Unavailability due to Rain (s/Year):	0	0	0	0
Unavailability due to Fading (%):	BER 10-3 3.08E-04	BER 10-6 3.87E-04	BER 10-3 3.52E-04	BER 10-6 4.43E-04
Unavailability due to Rain (%):	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Total Unavailability (%):	3.08E-04	3.87E-04	3.52E-04	4.43E-04
ITU Unavailability Objective (%):	2.50E-02	2.50E-02	2.50E-02	2.50E-02
Unavailability due to Fading (s/Year)	96.991	122.055	111.034	139.732
Unavailability due to Rain (s/Year):	0	0	0	0
Total Unavailability (s/Year):	96.991	122.055	111.034	139.732
ITU Unavailability Objective (s/Year):	7884	7884	7884	7884
	* PASS *	* PASS *	* PASS *	* PASS *

APÊNDICE II

APÊNDICE II - Relatório de Simulação Completo Gerado pelo *Software* Cellplan
para $K_{\text{méd}} = 0,72$

Site:	BTS0001	BTS0002
Type:	Cell Site	Cell Site
Latitude:	25°27'05.3"S	25°27'12.7"S
Longitude:	49°14'12.1"W	49°38'44.2"W
Altitude (m):	932	1200
	Forward Link	Reverse Link
Transmission Site:	BTS0001	BTS0002
Reception Site:	BTS0002	BTS0001
Radio Type:	NetRadio0001	NetRadio0001
Modulation Scheme:	DPSK-8	DPSK-8
Receiver Noise Figure (dB):	5	5
Maximum Data Rate (Mbps):	10	10
Symbol Rate (Ms/s):	12.5	12.5
Required Bit Error Rate:	BER 10-3	BER 10-6
Service Threshold (dBm):	-91	-90
Carrier to Noise Ratio (dB):	10.985	11.985
Cross Polarization Improvement Factor (dB):	20	20
Receiver Equalization Signature Factor:	0.1	0.1
Frequency Plan:	ITU-R 283-5 (6/14)	ITU-R 283-5 (6/14)
Frequency Channel:	Ch 1 2491.5 MHz	Ch 1' 2610.5 MHz
Center Frequency (MHz):	2491.5	2610.5
Channel Bandwidth (MHz):	14	14
Link Polarization:	Horizontal	Horizontal
Transmission Power (dBm):	30	30
Transmission Losses (dB):	5	5
Transmission Antenna:	Simepar	Simepar
Transmission Antenna Height (m):	40	20
Transmission Antenna Gain (dBd):	24	24
Transmission Antenna Gain (dBi):	26.14	26.14
Transmission Power EIRP (dBm):	51.14	51.14
Reception Losses (dB):	5	5
Reception Antenna:	Simepar	Simepar
Reception Antenna Height (m):	20	40
Reception Antenna Gain (dBd):	24	24
Reception Antenna Gain (dBi):	26.14	26.14
Link Distance (m):	41015.793	41015.793
Azimuth - True (°):	269.593	89.769

Azimuth - Magnetic (°):	287.538		107.456	
Transmission Inclination (°):	-0.346		0.346	
Reception Inclination (°):	-0.346		0.346	
Free Space Distance (m):	41016.543		41016.543	
Center Frequency (MHz):	2491.5		2610.5	
Free Space Loss (dB):	132.628		133.034	
Earth Radius Factor:	0.72			
Effective Radius (m):	4592259			
Diffraction Loss (dB):	0		0	
Atmospheric Pressure (hPa):	1013		1013	
Standard Temperature (°C):	15		15	
Water Vapour Density (g/m³):	7.5		7.5	
Atmospheric Gases Loss (dB):	0.294		0.296	
Total Path Loss (dB):	132.922		133.33	
Reception Signal Level (dBm):	-60.642		-61.05	
Service Threshold (dBm):	BER 10-3 -91	BER 10-6 -90	BER 10-3 -91	BER 10-6 -90
Link Gross Margin (dB):	30.358	29.358	29.95	28.95
Objective ITU Quality Grade:	Medium Grade Class 3 (50 Km)			
Multipath Model:	ITU			
Multipath Link Area:	Inland Link			
Multipath Terrain Type:	High altitude (> 700 m) Hills			
Multipath Climate Variable:	20			
Multipath Occurrence Factor:	3.33E-01		3.47E-01	
Fading Outage (%):	BER 10-3 3.07E-04	BER 10-6 3.86E-04	BER 10-3 3.51E-04	BER 10-6 4.42E-04
Selective Fading Outage (%):	6.06E-07	6.06E-07	6.25E-07	6.25E-07
Composite Fading Outage (%):	3.08E-04	3.87E-04	3.52E-04	4.43E-04
ITU Error Performance Objective (%):	2.00E-03	1.60E-01	2.00E-03	1.60E-01
Fading Outage (s/Month):	8.067	10.155	9.236	11.628
Selective Fading Outage (s/Month):	0.016	0.016	0.016	0.016
Composite Fading Outage (s/Month):	8.083	10.171	9.253	11.644
ITU Error Performance Objective (s/Month):	52.56	4204.8	52.56	4204.8
Precipitation Model:	ITU			
Precipitation Rate @ 0.01% (mm/h):	120			
Rainfall Attenuation (dB):	0.204		0.236	
Unavailability due to Rain (%):	BER 10-3 0.00E+00	BER 10-6 0.00E+00	BER 10-3 0.00E+00	BER 10-6 0.00E+00
Unavailability due to Rain (s/Year):	0	0	0	0
Unavailability due to Fading (%):	BER 10-3 3.08E-04	BER 10-6 3.87E-04	BER 10-3 3.52E-04	BER 10-6 4.43E-04
Unavailability due to Rain (%):	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Total Unavailability (%):	3.08E-04	3.87E-04	3.52E-04	4.43E-04
ITU Unavailability Objective (%):	2.50E-02	2.50E-02	2.50E-02	2.50E-02
Unavailability due to Fading (s/Year)	96.991	122.055	111.034	139.732
Unavailability due to Rain (s/Year):	0	0	0	0
Total Unavailability (s/Year):	96.991	122.055	111.034	139.732
ITU Unavailability Objective (s/Year):	7884	7884	7884	7884
	* PASS *	* PASS *	* PASS *	* PASS *

ANEXO I

ANEXO I- Especificações Técnicas do Equipamento de Rádio

Table A-4 Radio Characteristics

R-F Frequency Band	2.4 GHz (2400-2500 MHz)			
Number of selectable sub-channels	North America (FCC)	11		
	Europe (ETS)	13		
	France (FR)	4		
	Japan (JP)	1		
	Other Countries:	■ FCC 11 ■ ETS 13		
Modulation Technique	Direct Sequence Spread Spectrum ■ CCK for High & Medium Transmit Rate ■ DQPSK for Standard Transmit Rate ■ DBPSK for Low Transmit Rate			
Spreading	11-chip Barker Sequence			
Bit Error Rate (BER)	Better than 10 ⁻⁵			
Nominal Output Power	15 dBm			
Range (100 bytes User Data) / Transmit Rate	High Speed 11 Mb/s	Medium Speed 5.5 Mb/s	Standard Speed 2 Mb/s	Low Speed 1 Mb/s
Open Office Environment	160 m (525 ft.)	270 m (885 ft.)	400 m (1300 ft.)	550 m (1750 ft.)
Semi-Open Office Environment	50 m (165 ft.)	70 m (230 ft.)	90 m (300 ft.)	115 m (375 ft.)
Closed Office	25 m (80 ft.)	35 m (115 ft.)	40 m (130 ft.)	50 m (165 ft.)
Receiver Sensitivity	-83 dBm	-87 dBm	-91 dBm	-94 dBm
Delay Spread (at FER of <1%)	65 ns	225 ns	400 ns	500 ns

Table A-6 WaveLAN IEEE 802.11 Channels Sets

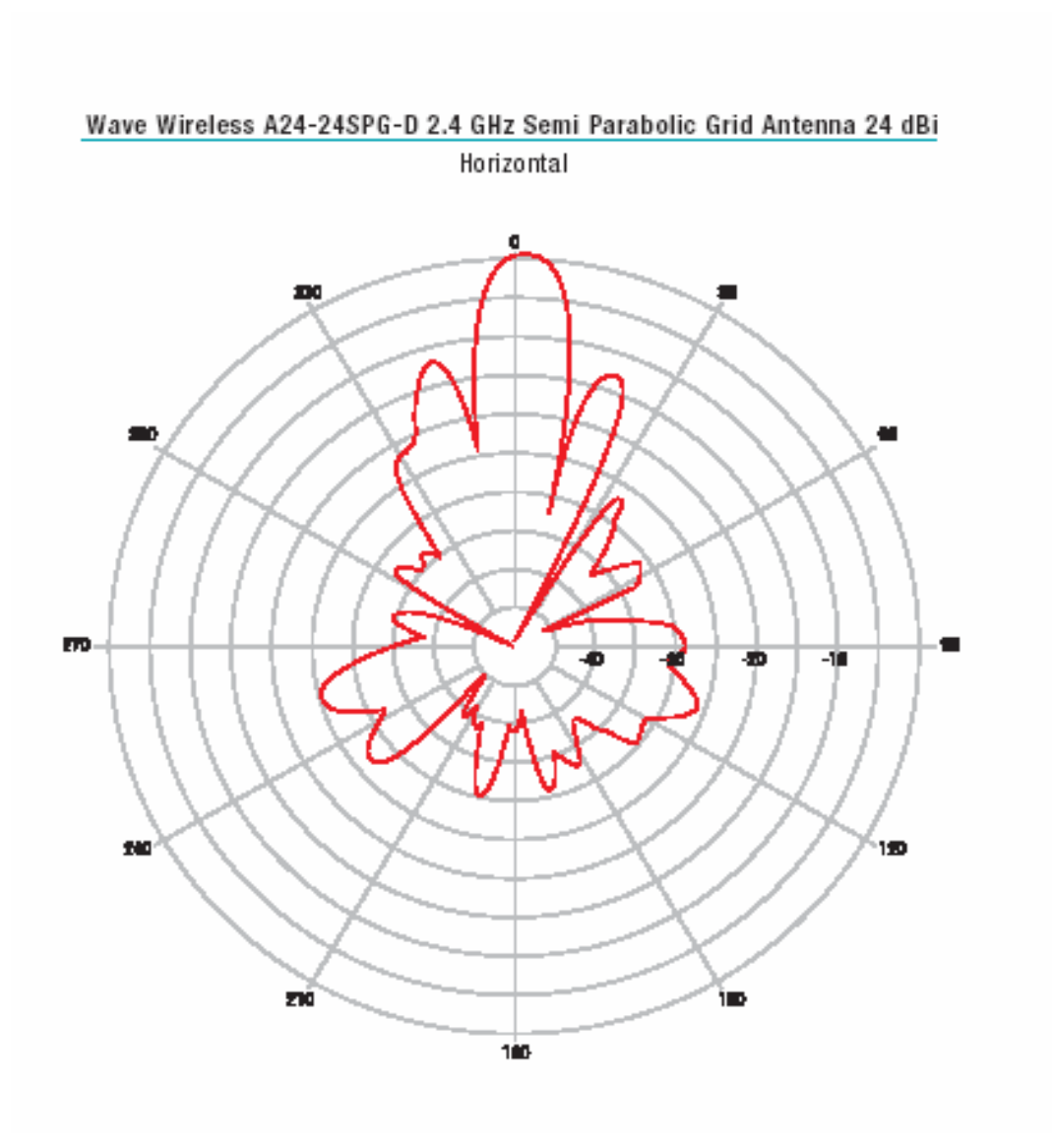
Frequency Range	2400-2500 MHz			
Channel ID	FCC	ETSI	France	Japan
1	2412	2412	-	-
2	2417	2417	-	-
3	2422	2422	-	-
4	2427	2427	-	-
5	2432	2432	-	-
6	2437	2437	-	-
7	2442	2442	-	-
8	2447	2447	-	-
9	2452	2452	-	-
10	2457	2457	2457	-
11	2462	2462	2462	-
12	-	2467	2467	-
13	-	2472	2472	-
14	-	-	-	2484

Table A-3 Networking Characteristics

Compatibility	IEEE 802.11 Standard for Wireless LANS (DSSS)	
Network Operating System	<ul style="list-style-type: none"> ■ Novell® Client 3.x & 4.x ■ Microsoft Windows® Networking 	
Host Operating System	Microsoft Windows® 95/98 and Windows® NT:	
	<ul style="list-style-type: none"> ■ NDIS Miniport Driver 	
	MS-DOS & Microsoft Windows 3.x:	
	<ul style="list-style-type: none"> ■ DOS ODI Driver ■ Packet Driver 	
	Windows CE	
Media Access Protocol	<ul style="list-style-type: none"> ■ Windows CE v.2.0 & 2.11 	
	Apple Macintosh Operating Systems:	
Data Rate	<ul style="list-style-type: none"> ■ Apple PowerBook G3 	
	CSMA/CA (Collision Avoidance) with Acknowledgment (ACK)	
	■ High	11 Mb/s
	■ Medium	5.5 Mb/s
	■ Standard	2 Mb/s
	■ Low	1 Mb/s
	The cards use an automatic Transmit Rate Select mechanism. Optionally the user can choose the fix the transmit rate at a specific speed.	

ANEXO II

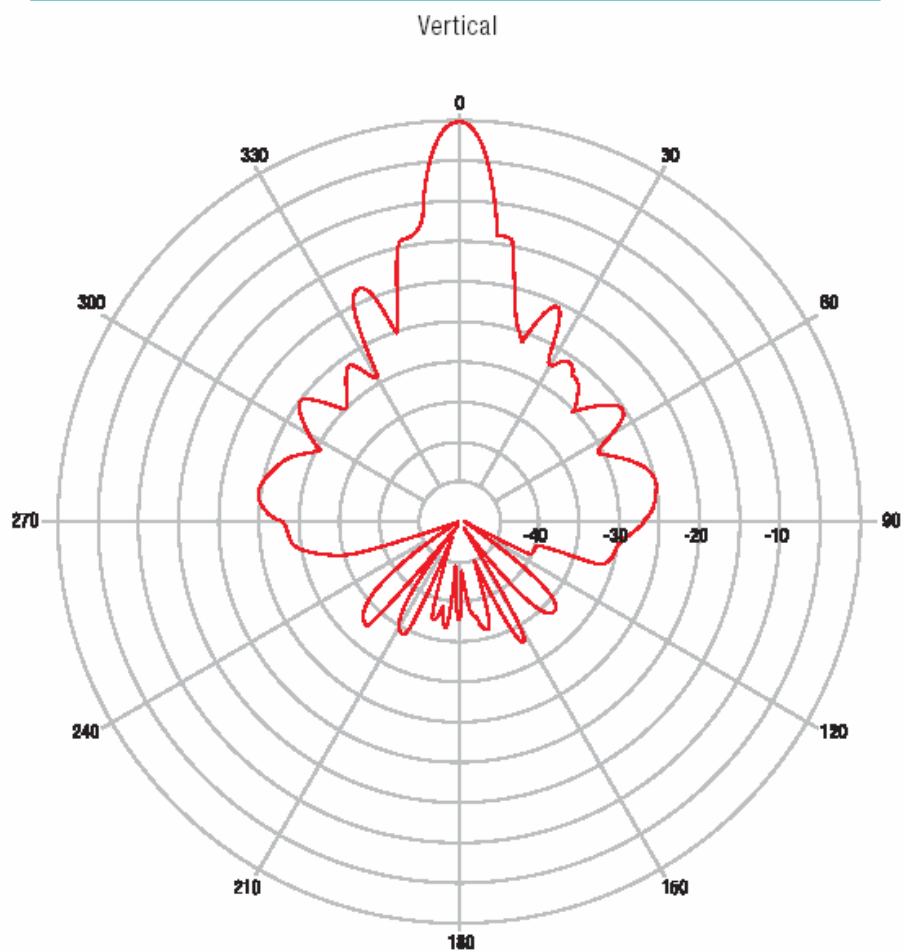
ANEXO II – Diagrama Horizontal da Antena Wave Wireless A24-24SPG-D 2,4GHz
Semi Parabolic Grid Antenna 24 dBi



ANEXO III

ANEXO III – Diagrama Vertical da Antena Wave Wireless A24-24SPG-D 2,4GHz
Semi Parabolic Grid Antenna 24 dBi

Wave Wireless A24-24SPG-D 2.4 GHz Semi Parabolic Grid Antenna 24 dBi



ANEXO IV

ANEXO 4 – Especificações técnicas do cabo coaxial LMR-600

LMR-600

TIMES MICROWAVE SYSTEMS

A Smiths Group plc company

LMR®-600

Flexible Low Loss Communications Coax

Ideal for...

- Jumper Assemblies in Wireless Communications Systems
- Short Antenna Feeder runs
- Any application (e.g. WLL, LMR, Paging, PCS, Cellular) requiring an easily routed, low loss RF cable



- **LMR®** standard is a UV Resistant Polyethylene jacketed cable designed for 20-year service outdoor use. The bending and handling characteristics are significantly better than air-dielectric and corrugated hard-line cables.

- **LMR®-DB** is identical to standard LMR plus has the advantage of being watertight. The addition of waterproofing compound in and around the foil/braid insures continuous reliable service should the jacket be inadvertently damaged during installation or in the future.

- **LMR®-FR** is a non-halogen (non-toxic), low smoke, fire retardant cable designed for in-building runs that can be routed anywhere except air handling plenums. LMR-FR has a UL/NEC & CSA rating of 'CMR/MPR' and 'FT4' respectively.

- **LMR®-FR-PVC** is a general-purpose indoor cable and has a UL/NEC & CSA rating of 'CMR/MPR' and 'FT4' respectively. It is less expensive than LMR-FR, however it emits toxic fumes (HCL) and greater smoke density when burned.

- **LMR®-PVC** is designed for low loss general-purpose indoor/outdoor applications and is somewhat more flexible than the standard polyethylene jacketed LMR.

- **LMR®-PVC-W** is a white-jacketed version of LMR-PVC for marine and other indoor/outdoor applications where color compatibility is desired.

- **Flexibility** and bendability are hallmarks of the LMR-600 cable design. The flexible outer conductor enables the tightest bend radius available for any cable of similar size and performance.

- **Low Loss** is another hallmark feature of LMR-600. Size for size LMR has the lowest loss of any flexible cable and comparable loss to semirigid hard-line cables.

- **RF Shielding** is 50 dB greater than typical single shielded coax (40 dB). The multi-ply bonded foil outer conductor is rated conservatively at > 90 dB (i.e. >180 dB between two adjacent cables).

- **Weatherability:** LMR-600 cables designed for outdoor exposure incorporate the best materials for UV resistance and have life expectancy in excess of 20 years.

- **Connectors:** A wide variety of connectors are available for LMR-600 cable, including all common interface types, reverse polarity, and a choice of solder or non-solder center pins. Most LMR connectors employ crimp outer attachment using standard hex crimp sizes.

- **Cable Assemblies:** All LMR-600 cable types are available as pre-terminated cable assemblies. Refer to the section on FlexTech for further details.

Part Description

Part Number	Application	Jacket	Color	Stock Code
LMR-600	Outdoor	PE	Black	54003
LMR-600-DB	Outdoor/Watertight	PE	Black	54093
LMR-600-FR	Indoor -Riser CMR	FRPE	Black	54032
LMR-600-FR-PVC	Indoor -Riser CMR	FRPVC	Black	54074
LMR-600-PVC	Indoor/Outdoor	PVC	Black	54219
LMR-600-PVC-W	Indoor/Outdoor	PVC	White	54206

Construction Specifications

Description	Material	In.	(mm)
Inner Conductor	Solid BCCAl	0.176	(4.47)
Dielectric	Foam PE	0.455	(11.56)
Outer Conductor	Aluminum Tape	0.461	(11.71)
Overall Braid	Tinned Copper	0.490	(12.45)
Jacket	(see table above)	0.590	(14.99)

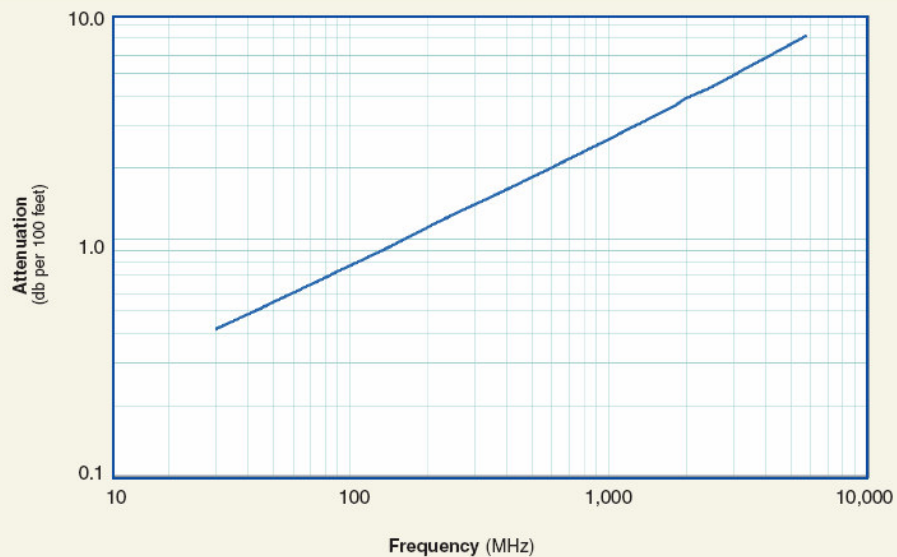


Mechanical Specifications			
Performance Property	Units	US	(metric)
Bend Radius: installation	in. (mm)	1.50	(38.1)
Bend Radius: repeated	in. (mm)	6.0	(152.4)
Bending Moment	ft-lb (N-m)	2.75	(3.73)
Weight	lb/ft (kg/m)	0.131	(0.20)
Tensile Strength	lb (kg)	350	(158.9)
Flat Plate Crush	lb/in. (kg/mm)	60	(1.07)

Environmental Specifications		
Performance Property	°F	°C
Installation Temperature Range	-40/+185	-40/+85
Storage Temperature Range	-94/+185	-70/+85
Operating Temperature Range	-40/+185	-40/+85

Electrical Specifications			
Performance Property	Units	US	(metric)
Cutoff Frequency	GHz	10.3	
Velocity of Propagation	%	87	
Dielectric Constant	NA	1.32	
Time Delay	nS/ft (nS/m)	1.17	(3.83)
Impedance	ohms	50	
Capacitance	pF/ft (pF/m)	23.4	(76.6)
Inductance	uH/ft (uH/m)	0.058	(0.19)
Shielding Effectiveness	dB	>90	
DC Resistance			
Inner Conductor	ohms/1000ft (/km)	0.53	(1.7)
Outer Conductor	ohms/1000ft (/km)	1.2	(3.9)
Voltage Withstand	Volts DC	4000	
Jacket Spark	Volts RMS	8000	
Peak Power	kW	40	

Attenuation vs. Frequency (typical)



Frequency (MHz)	30	50	150	220	450	900	1500	1800	2000	2500	5800
Attenuation dB/100 ft	0.4	0.5	1.0	1.2	1.7	2.5	3.3	3.7	3.9	4.4	7.3
Attenuation dB/100 m	1.4	1.8	3.2	3.9	5.6	8.2	10.9	12.1	12.8	14.5	23.8
Avg. Power kW	5.51	4.24	2.41	1.97	1.35	0.93	0.70	0.63	0.59	0.52	0.32

Calculate Attenuation =
 $(0.075550) \cdot \sqrt{\text{FMHz}} + (0.000260) \cdot \text{FMHz}$ (interactive calculator available at <http://www.timesmicrowave/telecom>)

Attenuation:
 VSWR=1.0; Ambient = +25°C (77°F)

Power:
 VSWR=1.0; Ambient = +40°C; Inner Conductor = 100°C (212°F); Sea Level; dry air; atmospheric pressure; no solar loading